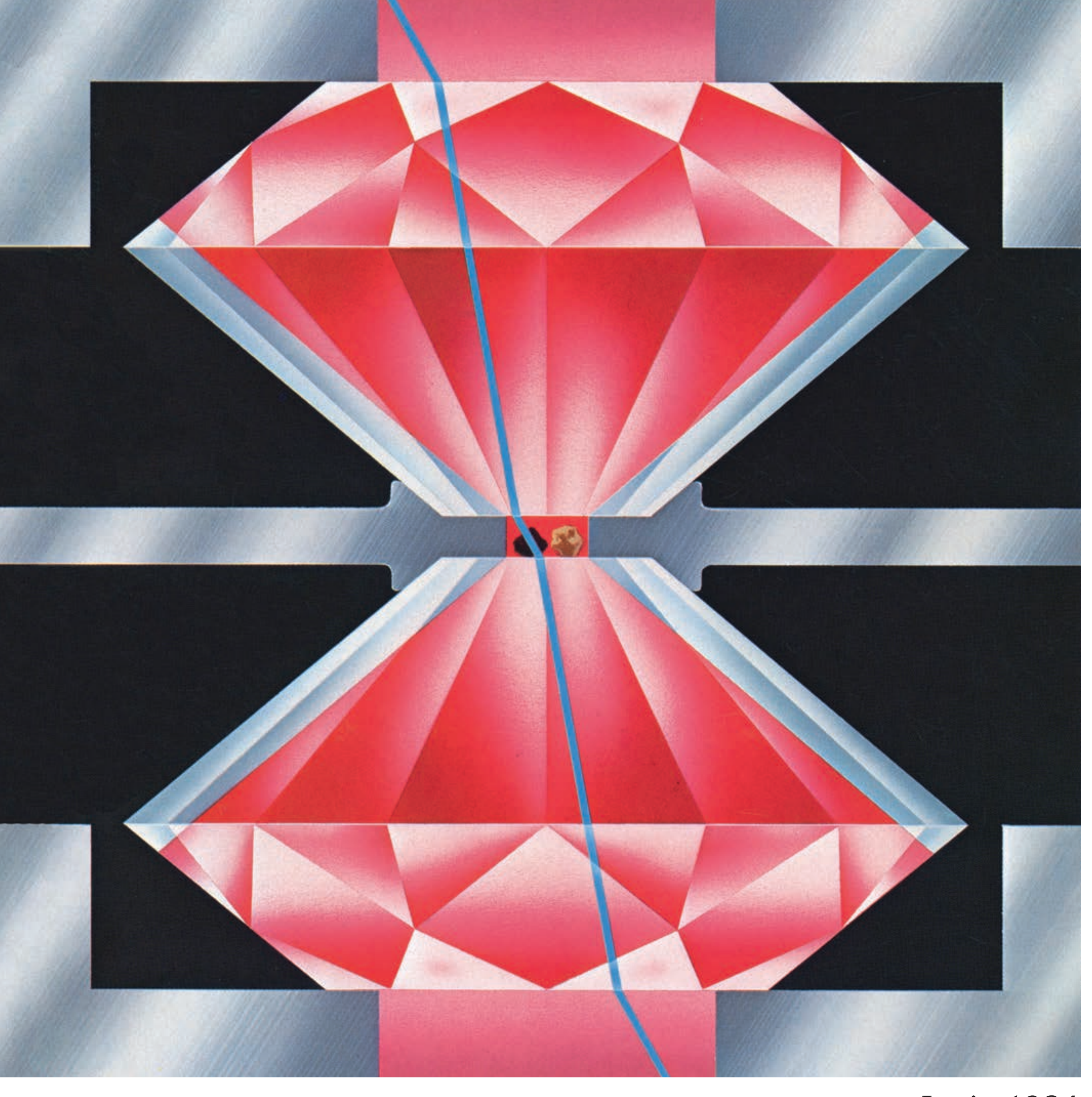
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



CELDILLA DE DIAMANTES PARA ALTAS PRESIONES

Junio 1984

350 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 93
Junio 1984

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

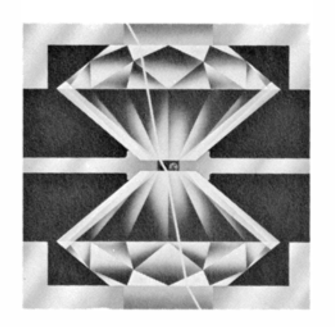
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Michel Mongard: *Lactancia materna*; Manuel Puigcerver: *Nubes moleculares, formación de estrellas y estructura galáctica* y *El tornado*; Juan Pedro Adrados: *Celdilla de yunques de diamante para producir altas presiones*; Luis Bou: *La visión por humanos y máquinas* y *Juegos de ordenador*; Ramón Fontarnau y F. E. Lynd: *Base molecular de la forma animal*; Joandomènec Ros: *El comportamiento de nidificación de los dinosaurios*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

José F. Prida, Tomás G. Villa y Julio Rodríguez Villanueva, Esteban Rodríguez Ocaña, Ramón Pascual y Luis Mas



LA PORTADA

Muestra el mecanismo central de un nuevo dispositivo que puede generar presiones tan altas como las existentes en el límite entre el núcleo y el manto de la Tierra: alrededor de 1,7 millones de atmósferas (véase "Celdilla de yunques de diamante para producir altas presiones", por A. Jayaraman, en este mismo número). Dos diamantes de joyería, cada uno con un peso de medio quilate, se colocan en oposición para producir un empuje a lo largo de su eje vertical central. Entre ambos diamantes se encuentra la celdilla para altas presiones: orificio taladrado de una lámina de acero endurecido, que se muestra en su corte transversal. La presión ejercida por los diamantes extrusiona la lámina alrededor de los bordes de éstos. Dentro de la celdilla hay un cristal de monosulfuro de samario que cambia de color negro a dorado a una presión de 7000 atmósferas. También se distingue un rubí rojo. Cuando el haz de un láser azul se enfoca a través del diamante sobre el rubí, éste fluoresce con un rojo intenso.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029-Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - 08010-Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029-Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030-Madrid
Teléfono 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.° - 08034-Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente	Página	Fuente
11-16	Ilil Arbel	75	Gerald M. Edelman
17	Wellcome Institute for the History of Medicine	76-77	Tom Prentiss
19	Observatorio Kitt Peak	78	Ilil Arbel (*arriba*), Gerald M. Edelman (*abajo*)
20	Kitt Peak (*arriba, izquierda*), Nick Scoville (*arriba, derecha*), Observatorio Lick (*abajo, izquierda*), Gareth Wynn-Williams (*abajo, derecha*)	79	Ilil Arbel (*arriba*), Gerald M. Edelman (*en medio*), Carolyn Cohen (*abajo*)
22	Nick Scoville	80	Ilil Arbel
23	Nick Scoville y Judith S. Young (*izquierda*) James Smith (*derecha*)	81	Gerald M. Edelman (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
24-26	Allen Beechel	82-86	Tom Prentiss
28	Kwok-Yung Lo	89	Doug Henderson
30	Observatorios Hale (*arriba*), Nick Scoville y Judith S. Young (*abajo*)	90	Patricia J. Wynne
33-34	Walken Graphics	91	Robert Makela
35	A. Jayaraman	92	Patricia J. Wynne (*arriba*), John R. Horner (*abajo*)
36-40	Walken Graphics	93-94	Patricia J. Wynne
49	Severe Storms Laboratory	95	Doug Henderson
50	David Hoadley	98	Antonio Ruiz Marcos
51-55	George V. Kelvin	100	A. Ruiz Marcos (*arriba*), Departamento de Biofísica del Instituto Cajal (*abajo*)
56	Howard B. Bluestein	101	A. Ruiz Marcos (*arriba*) Juan Cotoner y A. Ruiz Marcos (*abajo*)
57-59	George V. Kelvin	102-104	J. Cotoner y A. Ruiz Marcos
61	Robert J. Woodham (*arriba*), W. Eric L. Grimson (*abajo*)	105	J. Cotoner y J. Sala
62	H. Keith Nishihara	106-107	J. Cotoner y A. Ruiz Marcos
63	Ian Worpole (*arriba*) MIT (*abajo*)	108	A. Ruiz Marcos (*arriba, izquierda*), J. Cotoner y A. Ruiz Marcos (*arriba derecha y abajo*)
66-67	H. Keith Nishihara	110-114	Ilil Arbel
68-69	MIT	117-120	Michael Goodman
70-72	Ian Worpole		

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

R. V. SHORT ("Lactancia materna") detenta la cátedra de biología de la reproducción de la Universidad de Monash, Australia. Se licenció en veterinaria por la Universidad de Bristol, en 1954, prosiguiendo sus estudios en los Estados Unidos. Tras doctorarse en genética por la Universidad de Wisconsin, en 1955, retornó a Inglaterra. Comparte su actividad académica en Monash con la presidencia de Salud Familiar Internacional con sede en Research Triangle Park, Chapel Hill, Carolina del Norte. En el campo de la investigación se ha dedicado preferentemente al estudio de los aspectos comparativos de la reproducción.

NICK SCOVILLE y JUDITH S. YOUNG ("Nubes moleculares, formación de estrellas y estructura galáctica") son astrónomos que han trabajado intensamente en el tema sobre el que versa su artículo en longitudes de onda de radio. Scoville es profesor de astronomía del Instituto de Tecnología de California. Tras doctorarse por la Universidad de Columbia investigó en la de Minnessota y en el Instituto de Tecnología de California. De 1975 a 1983 enseñó astronomía en la Universidad de Massachusetts en Amherst, trabajo al que renunció al aceptar su cargo actual. Entre sus investigaciones se cuentan la exploración de la estructura de las galaxias por medio de las emisiones del monóxido de carbono y estudios detallados de las regiones de formación de estrellas. "Supone para mí una constante fuente de placer la labor deductiva subsiguiente a los muy limitados datos observacionales; he aprendido de ello que nuestras predicciones quedan cortas al compararlas con la realidad astronómica." Young es miembro del departamento de física y astronomía de la Universidad de Massachusetts. Cursó astronomía en la Universidad de Harvard y se doctoró en física, por la de Minnessota.

A. JAYARAMAN ("Celdilla de yunques de diamante para producir altas presiones") pertenece a la plantilla técnica de los laboratorios AT & T Bell. Nacido en la India, estudió en la Universidad de Madrás, por la que se licenció en 1946. En 1950 se trasladó al Instituto Raman de Investigación donde trabajó con el físico C. V. Raman sobre los fenómenos ópticos en sólidos. En 1960 se instaló en los Estados Unidos, ingresando en el Instituto de Geofísica de la Universidad de California en Los Angeles. Comenzó entonces a interesarse en la física y química de los sólidos a altas presiones, tema en el que sigue investigando desde que entró en los laboratorios Bell, en 1963.

JOHN T. SNOW ("El tornado") es profesor agregado de geofísica de la Universidad Purdue. Cursó ingeniería eléctrica en el Instituto de Tecnología Rose-Hulman, por el que se graduó en 1968. Ingresó luego en el ejército de los Estados Unidos. Tras licenciarse prosiguió estudios en Purdue, que le concedió el doctorado en ciencias atmosféricas en 1977. "En el campo profesional me interesa, nos comenta, la dinámica de corrientes en remolino, tormentas intensas, predicción de fenómenos de mesoescala y observaciones meteorológicas. La mayoría de mis esfuerzos actuales se dirigen a descifrar la física de los intensos vórtices en forma de columna, como el tornado."

TOMASO POGGIO ("La visión por humanos y máquinas") es profesor adjunto del departamento de psicología y del laboratorio de inteligencia artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts. "Tras completar mi tesis en física teórica, en la Universidad de Génova, nos cuenta, fui a trabajar con Werner Reichardt, en el Instituto Max Planck de Cibernética Biológica, de Tübingen, para estudiar el sistema visual de la mosca. En 1976 comencé a colaborar con David Marr, ya fallecido, del MIT, en el enfoque computacional de la visión. Emprendí al mismo tiempo un trabajo de carácter complementario: tratar de comprender el mecanismo del procesamiento de información que realiza el cerebro, y sus fundamentos, determinados por las propiedades biofísicas de las neuronas."

GERALD M. EDELMAN ("Base molecular de la forma animal") es profesor de la Universidad Rockefeller. Cursó el primer ciclo de ciencias en el Ursinus College, licenciándose en medicina por la Universidad de Pennsylvania, en 1954. Después de un año de residencia en el Hospital General de Massachusetts, y de servir dos años con el empleo de capitán en el cuerpo de sanidad del Ejército de los Estados Unidos, ingresó en la Rockefeller. Versó su tesis doctoral, defendida en 1960, sobre la estructura de la gammaglobulina, proteína de importancia decisiva en la respuesta inmunitaria. En 1969 describió la secuencia de aminoácidos y las subunidades de la estructura de la gammaglobulina, tarea por la que fue galardonado con el premio Nobel de medicina y fisiología en 1972.

JOHN R. HORNER ("El comportamiento de nidificación de los dinosaurios") es conservador del Museo de las Montañas Rocosas y profesor adjunto de geología de la Universidad estatal de Montana en Bozeman. En 1976 entró de ayudante de investigación en el departamento de ciencias geológicas y geofísicas de la Universidad de Princeton y de conservador ayudante del Museo de Historia Natural del mismo centro. En 1982 alcanzó los cargos que ocupa en la actualidad.

ANTONIO RUIZ MARCOS ("Modelos matemáticos en biología") se doctoró en ciencias físicas por la Universidad Complutense de Madrid, en 1965, con una tesis sobre un modelo matemático que explica de manera coherente las propiedades de contractibilidad del miocardio, trabajo realizado bajo la dirección de Bonnet Seoane, siendo éste quizás el primer modelo matemático de un sistema biológico que se construía en España, y al que le fue concedido el premio Gregorio Marañón del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Trabajó un año en Alemania con O. Creutzfeld, becado por el Instituto Max Planck, y dos años en la Universidad de California en Los Angeles con José P. Segundo, becado por los National Institutes of Health. Sus trabajos han merecido en España el premio Cajal del CSIC, en 1971, por el modelo matemático de distribución sináptica en la corteza cerebral y junto con los doctores Escobar del Rey y Morreale de Escobar el premio Reina Sofía, por la aplicación de este modelo al estudio del efecto que el hipotiroidismo ejerce en el desarrollo de la estructura cortical del cerebro. En 1971 "The Bioscience: Cell and Molecular Biology Council" de la Universidad de California en Stanford seleccionó el trabajo realizado en colaboración con el doctor Valverde, en que se describe el algoritmo matricial, útil para cuantificar neuronas y que explica en el último apartado de este artículo, como uno de los 20 mejores publicados en los 10 últimos años en la investigación de células nerviosas.

Hace...

José M.ª López Piñero

... doscientos años

Antonio José Cavanilles publicó en París *Observations... sur l'article Espagne de la nouvelle Encyclopédie*, cuya traducción al castellano editó aquel mismo año la Imprenta Real, de Madrid. Esta obra fue uno de los textos centrales del enfrentamiento que Laín Entralgo, los hermanos García Camarero y los demás autores que se han ocupado del tema consideran como primera fase de la "polémica de la ciencia española". El factor desencadenante de la polémica propiamente dicha fue, como es de sobra conocido, la publicación, en la *Encyclopédie méthodique*, del artículo "Espagne" de Nicolás Masson de Morvilliers (1782). Por los estudios de Ricardo Pascual sabemos, sin embargo, que veinte años antes se había publicado una apología de la ciencia española que reúne las características fundamentales de los escritos de la polémica en sus distintas etapas.

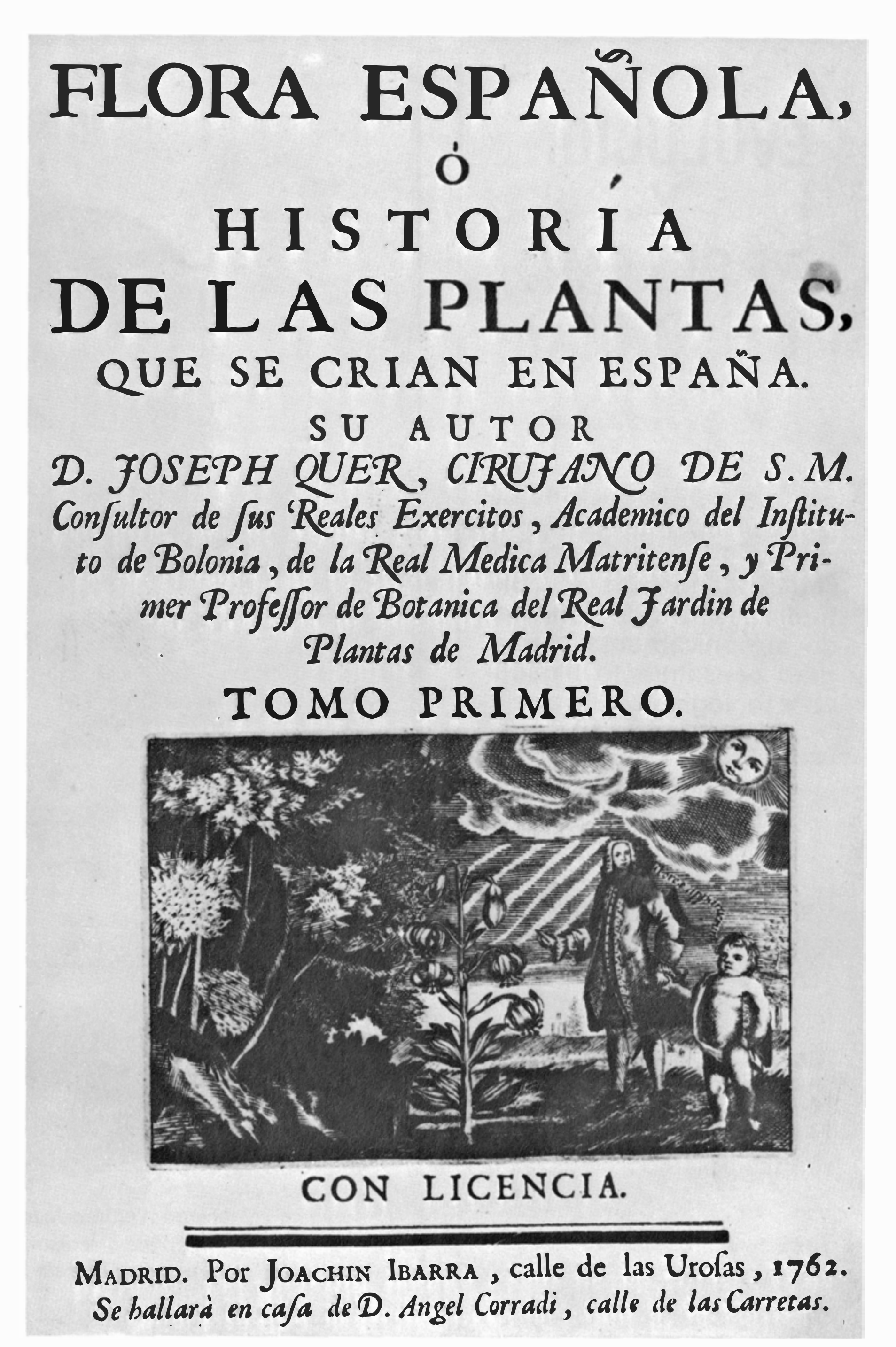
El autor de dicha apología fue el naturalista José Quer, que entonces ocupaba el cargo de Primer Profesor en el Jardín Botánico de Madrid. Convencido seguidor de Tournefort, Quer luchó con todas sus fuerzas contra la taxonomía botánica introducida por Linneo. Recordemos que ésta acabó imponiéndose muy pronto en España y que el científico sueco mantuvo una estrecha y fructífera relación con los botánicos españoles de la generación siguiente. Desde 1751 residió en nuestro país Loeffling, su discípulo predilecto, que mantuvo con su maestro una correspondencia en la que le proporcionó abundante información acerca de la producción científica española. A finales del citado año, decía Linneo en una de sus cartas: "Leí con sorpresa que sean tantos los botánicos verdaderamente eruditos e insignes y de los cuales apenas sabía los nombres; cuidaré de que lleguen a ser conocidos en todo el orbe y hazles presente mi afectuosísima consideración".

Todo ello no impidió a Quer desenterrar en 1762 una alusión despectiva al bajo nivel de los estudios botánicos en España, perteneciente a una obra publicada por Linneo en 1736. Desde la perspectiva de su enemistad científica, la convirtió en motivo de indignación nacionalista. Incluyó por ello una apología sistemática de la ciencia española como colofón del *Discurso analítico sobre los métodos botánicos*, redactado para refutar el sistema de Linneo e impreso en el primer volumen de su *Flora Española* (1762).

La apología se centra en los siglos XVI y XVII. Insiste en la importancia de la contribución española al conocimiento de la historia natural americana y reitera las reivindicaciones de prioridad habituales en la retórica nacionalista de este momento histórico: descubrimiento de la circulación de la sangre por Francisco de la Reina y Serveto, aportaciones originales de Gómez Pereira y Sabuco, etc. La postura panegírica había ya establecido unos lugares comunes que iban a persistir a lo largo de dos siglos. Lo mismo que haría el Menéndez Pelayo joven cien años más tarde. Quer completó su apología con un *Catálogo de los autores españoles que han escrito de Historia Natural*. La enumeración, basada casi exclusivamente en datos de Nicolás Antonio, no significó, por supuesto, avance alguno de carácter erudito.

Más estéril todavía, desde el punto de vista de los estudios históricos, fue la polémica desencadenada por el artículo de Masson (1782). Conviene advertir, ante todo, que el objetivo de este último era atacar la represión de la actividad científica por parte de la censura y de la Inquisición, e indirectamente las estructuras sociopolíticas que la hacían posible: "El español tiene aptitud para las ciencias, existen muchos libros, y, sin embargo, quizá sea la nación más ignorante de Europa. ¿Qué se puede esperar de un pueblo que necesita permiso de un fraile para leer y pensar?... Toda obra extranjera es detenida: se la hace un proceso y se la juzga... Un libro impreso en España sufre regularmente seis censuras antes de poder ver la luz, y son un miserable franciscano o un bárbaro dominico quienes deben permitir a un hombre de letras tener genio". Es verdad que en su crítica Masson desconoce por completo la realidad histórica del cultivo de la ciencia en España. No suele, sin embargo, recordarse que, como buen ilustrado, elogia "los medios que acaba de emplear el gobierno", afirma que "España cuenta ya con varios sabios célebres en física e historia natural" y termina, exclamando: "¡Un esfuerzo más y quién sabe hasta qué punto puede elevarse esta magnífica nación!".

La polémica que provocó este artículo fue un mero debate ideológico que no contribuyó, ni siquiera indirectamente, al conocimiento histórico de la ciencia en España. Cavanilles respondió a Masson desde una postura nacionalista atenida a la mentalidad ilustrada. Su finalidad fundamental era demostrar que, bajo la administración de Carlos III, el país estaba en parte recuperando su glorioso pasado científico y técnico. En esta ocasión no se detuvo en el estudio de este último –como haría en su etapa madura, con frutos tan notables como el redescubrimiento de la obra de Bernabé Cobo– sino que se limitó a una argumentación retórica, amontonando apresuradas menciones a figuras y logros, sobre todo del período renacentista, como Miguel Serveto, Luis Mercado, Pedro Ponce de León, las contribuciones de naturalistas y navegantes en América, las invenciones de ingenieros militares, etc. Mucho más interesado estaba entonces en desmentir a Masson en el terreno de la actividad científica española de su propia época: "Estaba reservado a M. Masson el ofrecernos un modelo de la ignorancia más culpable y el de la presunción más audaz. Tales son los medios con los que este escritor ha trazado, en el pequeño número de páginas que ha compuesto, el cuadro más injusto y más falso de la nación española. Si le creemos, esta nación está todavía hoy en el letargo; está envuelta en tinieblas, y en una ignorancia tan censurable que desdeña las luces que se le presentan, y que cierra la puerta a toda instrucción... Si la delicadeza que él dice profesar, y el deseo de escribir una obra exacta y verdadera, hubieran guiado su pluma, habría consultado las verdaderas fuentes en lugar de las falsas. Pero no, él sabía cuán insuficiente era su instrucción. Sin duda se ha dicho: Yo no he visto España, no he leído las obras de los españoles, no entiendo su lengua, ignoro las sabias ordenanzas que el rey actual ha dado y da cada día para alentar la agricultura, el comercio, las ciencias y las artes, para aumentar sobre todo la felicidad de sus súbditos; apenas he oído hablar de las sociedades patrióticas cuyo establecimiento en las principales ciudades desarrolla de día en día el espíritu nacional presto ya a tomar auge y a hacerse digno de los elogios que merecen las naciones más distinguidas. M. Masson se ha dicho todas estas verdades: pero ha querido ser autor de algunos artículos de la Enciclopedia; sabía que las expresiones exa-



FLORA ESPAÑOLA,

Ó

HISTORIA

DE LAS PLANTAS,

QUE SE CRIAN EN ESPAÑA.

SU AUTOR

D. JOSEPH QUER, CIRUJANO DE S. M.

Consultor de sus Reales Exercitos, Academico del Instituto de Bolonia, de la Real Medica Matritense, y Primer Professor de Botanica del Real Jardin de Plantas de Madrid.

TOMO PRIMERO.

CON LICENCIA.

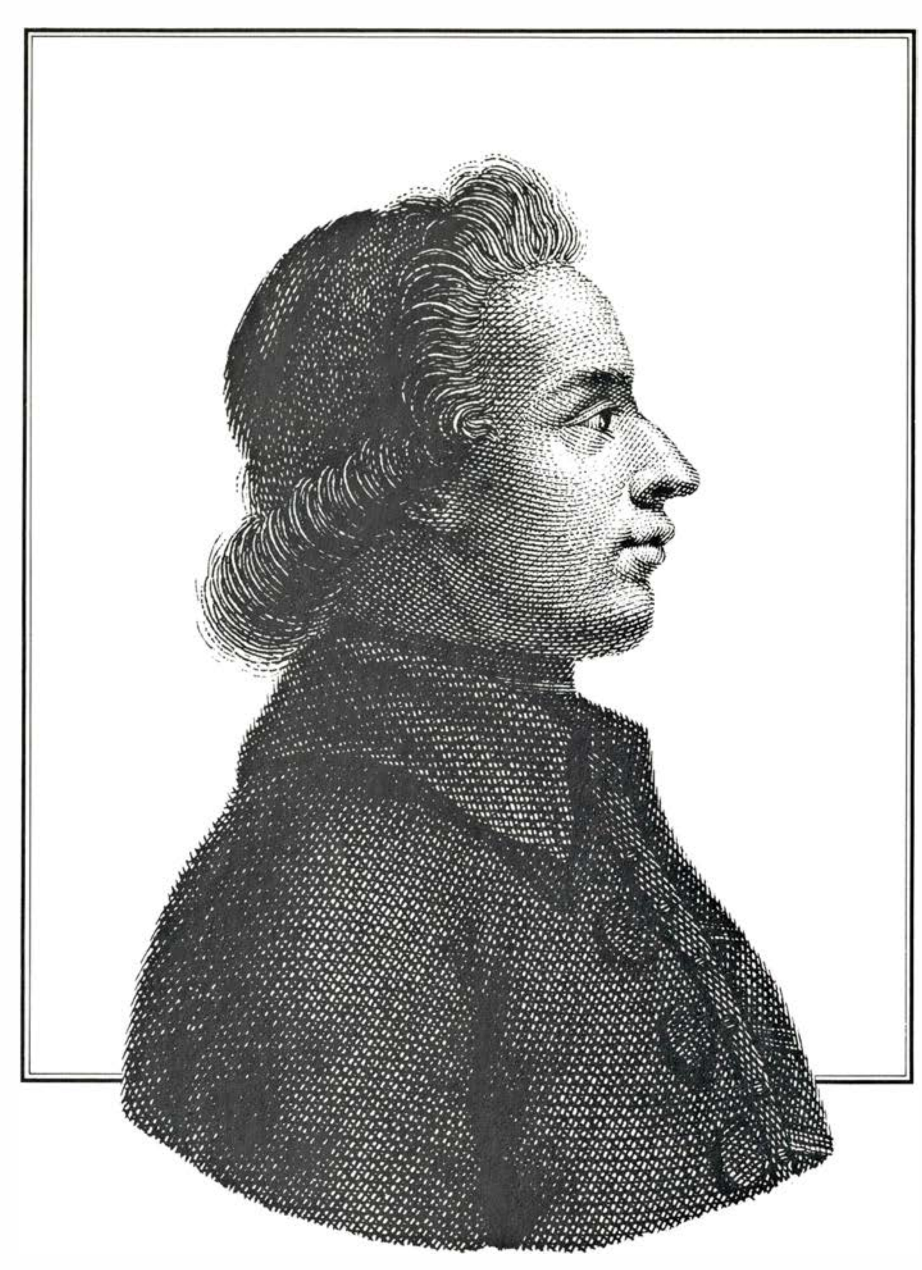
MADRID. Por JOACHIN IBARRA, calle de las Urosas, 1762.

Se hallarà en casa de D. Angel Corradi, calle de las Carretas.

1. Portada de la **Flora Española** *(1762), del catalán José Quer (1695-1764), que incluye la primera apología de la ciencia española*

geradas son las que más excitan la curiosidad; que el público recibe con alegría todos los cargos; y, según esto, se determinó a presentar una que pareció ser el golpe eléctrico que su humanidad administraba a los paralíticos españoles... Es cierto que hoy no poseemos un d'Alembert ni un Euler. ¿Y dónde están estos genios que el gobierno llama en vano, y que se niegan a tantas generaciones? Los países dichosos que producen estos grandes hombres ven nacer los discípulos que celebran y perpetúan su gloria. Pero si estos talentos raros no existen actualmente en España, ¿no tendríamos algunos hombres que merecieran la indulgencia de M. Masson? ¿Conoce los cursos de matemáticas del padre Tosca, de Bails? ¿Conoce a don Antonio Rosell, profesor del colegio de S. Isidro, y a don Francisco Subiras, profesor del colegio de los nobles, quienes después de haber desempeñado sus cátedras con la más grande distinción, acaban de ser nombrados por el rey para seguir la ribera de las Amazonas, y verificar las observaciones hechas hasta aquí? Le citaremos aún a don José de Mazarredo, autor de la táctica naval; don Rafael de Lasala, obispo de Solsona; don Rafael Clavijo, oficial de marina, que dirige las construcciones de El Ferrol. ¿Por qué M. Masson debe ignorar la existencia del único compañero del abate Chappe que ha regresado de la desgraciada expedición de California? D. Vicente Doz fue quien, refiriendo las observaciones del francés, le agrega las suyas. Todavía poseemos los profesores Durán, Solano, Ximénez, Mas, etc. Si no han llegado hasta M. Masson los nombres de estos hombres distinguidos, los astrónomos de Francia conocen a don Vicente Tofiño y a don José Valera; ellos podrán hablarle de don Antonio Ulloa, conocido por sus obras de geografía, de matemáticas y de astronomía, por la observación del eclipse de sol del 24 de junio de 1778, en el cual descubrió un punto luminoso en la luna; y en fin, por su viaje al Perú con M. de la Condamine y con don Jorge Juan. Nombrando a este último, M. Masson experimentará quizás alguna sorpresa al haber olvidado que España había producido un hombre cuyas obras han sido traducidas a todas las lenguas, y que han sido conocidas ventajosamente en toda Europa. El autor del tratado sobre la resistencia de los fluidos, que presenta resultados tan interesantes, habría bastado a España para rebatir los insultos de M. Masson".

Dos años más tarde, en 1786, la polémica produjo otras tres aportaciones dignas de mención. La primera de ellas fue el discurso *Réponse a la question que doit-on a l'Espagne*, que publicó en Berlín Carlo Denina, funcionario en la corte prusiana, quien habló en defensa de las instituciones del "ancien régime" y con una evidente agresividad ante lo francés. La segunda, la *Oración apologética por la España y su mérito literario*, de Juan Pablo Forner, obra que un siglo más tarde, en la segunda fase de la polémica, fue esgrimida como recurso propio por Menéndez Pelayo y otros tradicionalistas. Sin desmentir su casticismo, François López ha situado adecuadamente la postura de Forner, en su espléndido estudio acerca de su pensamiento: "No dice nada más que lo que podrían afirmar un Floridablanca o un Campomanes. ¿No está la *Oración* completamente al servicio de la gloria de la Ilustración y del absolutismo ilustrado". La tercera de dichas aportaciones fue la serie de artículos que Luis Cañuelo publicó en la revista *El Censor* entre 1786 y 1787. La defensa de Mas-



2. El botánico valenciano Antonio José Cavanilles (1745-1804), cuya defensa de la ciencia española (1784) frente a Masson de Morvilliers fue uno de los textos centrales de la primera fase de la polémica en torno al tema.

son y la crítica a los apologistas que hizo en ella fue poco más que un pretexto para atacar las estructuras sociopolíticas tradicionales. Con agrio sarcasmo llegó a decir: "Han florecido las *verdaderas* ciencias y artes entre nosotros como en ninguna parte de Europa. Porque en ninguna parte ha florecido esta cierta teología, esta cierta moral, esta cierta jurisprudencia civil y canónica, y esta cierta política que nos ha proporcionado nuestra pobreza e ignorancia, o nuestra ignorancia y pobreza, que tanto contribuye para la verdadera felicidad. Y hemos contribuido mucho más, aunque indirectamente, que ninguna otra nación por el mismo medio de nuestra pobreza, efecto de nuestra ignorancia, y ésta efecto del cultivo de estas ciencias que acabé de nombrar, y del abandono de las otras, a los progresos de *las menos sólidas y verdaderas*, tales como son las matemáticas, la filosofía, las ciencias eclesiásticas de que hablé, etc... Pero consolémonos, que aún permanecen en pie los principales obstáculos. Nuestra pobreza y nuestra ignorancia nunca han ido a menos: es verdad. Pero consolémonos con que mientras ésta sea común no hay que temer esfuerzos del gobierno para arrancarlos y hacernos prosperar. Consolémonos con que mientras haya apologistas, ellos mantendrán esta ignorancia, y la harán aún más común de lo que es".

Lactancia materna

Con la tendencia hacia la lactancia artificial se ha ido olvidando el efecto contraceptivo del amamantamiento. Lo que se traduce, en los países en desarrollo, en aumento demográfico y detrimento de la salud infantil

R. V. Short

La lactancia al pecho es el contraceptivo de la naturaleza. En los más remotos tiempos se sabía ya que la mujer que amamantaba al hijo no solía quedar embarazada durante el período de lactancia. Hoy, sin embargo, considerar que tal práctica desempeñe una función contraceptiva pertenece, para la mayoría de nuestros contemporáneos, al reino de los mitos. Cambio de actitud que ha acarreado graves repercusiones, en particular por lo que a la tasa demográfica y a la salud infantil de los países en vías de desarrollo se refiere.

Por su parte, las naciones industrializadas ven en el amamantamiento un añadido a la reproducción humana, un suplemento opcional al final del proceso, como esos rótulos que siguen al fin de la película, importantes para muy pocos pero sin mayor interés ni emoción para la mayoría de los espectadores. Un tema que, además, ha recibido escasa atención de un extenso sector de los profesionales de la medicina. No hay especialidad médica que le esté consagrada. La función del obstetra acaba con el alumbramiento y el alta del hospital de la madre.

El ginecólogo dedica escasa consideración al pecho como parte integrante de las vías reproductoras. El pediatra, por lo general, se ocupa más del cuidado de los niños enfermos que de establecer la lactancia materna en un ambiente familiar normal. Por último, muy pocos médicos dedicados a la planificación familiar pensarían en recomendar la lactancia materna como sistema contraceptivo.

Por esta razón, y a falta de otros, es el cirujano quien a menudo se convierte en el especialista en mamología, pues el cáncer mamario constituye la neoplasia humana más frecuente. (Pero como hay algunos que llegan al extremo de recomendar la extirpación de los senos y su remplazo por prótesis de silicona para prevenir la enfermedad, no deberá sorprendernos el poco espacio que se dedica a la lactancia materna en los textos y aulas médicas y, por consiguiente, el mínimo interés que suscita como tema de investigación.) Y llegamos a la paradoja de que la sociedad conozca mucho mejor la ubre de la vaca que el delicado seno materno.

No acertar a reconocer la plena trascendencia de la lactancia materna como método para espaciar los nacimientos y conservar la salud infantil, por parte de médicos, científicos, teólogos, administradores y políticos de los países desarrollados, ha traído graves consecuencias a los países en vías de desarrollo. Según datos recientes de la Organización Mundial de la Salud, se calcula que sólo un 17 por ciento de las parejas de los países del tercer mundo utilizan métodos anticonceptivos modernos. Por consiguiente, el 83 por ciento restante depende totalmente de las barreras naturales para contener la fertilidad, de las cuales la lactancia materna es, sin duda, la más importante.

El reciente Estudio Mundial sobre Fertilidad, organizado por el Instituto Internacional de Estadística de Londres, demostró que en muchos países en vías de desarrollo las mujeres jóvenes con educación, de origen urbano y con medios económicos han abandonado la lactancia materna sustituyéndola por el biberón. Puesto que son estas madres jóvenes las que establecen las pautas de conducta y modas en sus respectivas comunidades, su influencia se extiende a las mujeres de los estratos urbanos y rurales más pobres, que son precisamente las que gozan de menos oportunidades de utilizar métodos anticonceptivos modernos, y cuyos hijos se beneficiarían en mayor medida de la lactancia natural.

Ron Lesthaeghe, de la Universidad Libre de Bruselas, ha calculado que en Bangladesh, donde sólo un 9 por ciento de las mujeres utilizan anticonceptivos y donde la amenorrea lactacional (ausencia de menstruación durante el período de lactancia) tiene una duración media de 18,5 meses, debería aumentar el uso de anticonceptivos hasta un 43 por ciento, sólo para mantener el nivel de fertilidad en su valor actual, si se redujese la amenorrea lactacional a seis meses. En Kenia, donde sólo un 7 por ciento de las mujeres usan contraceptivos, gran parte del reciente y acusado aumento de la fertilidad hasta el nivel medio actual, en torno a los ocho nacimientos por mujer, puede atribuirse directamente a una disminución de la lactancia natural. Dada la imposibilidad de alentar un incremento rápido en el uso de contraceptivos en dichos países, resulta perentorio mientras tanto evitar una mayor pérdida del efecto contraceptivo de la lactancia materna.

Sería injusto atribuir a los fabricantes de leche en polvo el haber iniciado la tendencia hacia la lactancia artificial; ésta ya comenzó hace siglos. Sin embargo, son directamente responsables de perpetuar y facilitar dicha moda en los países no industrializados, en detrimento de la salud materna e infantil. Es significativo que los Estados Unidos, donde tienen su sede muchas de las empresas fabricantes de leche en polvo, fuese el único país que rehusó aprobar, en 1981, el Código Internacional de Comercialización de Sustitutos de Leche Materna, que limita una publicidad y venta agresivas de leche condensada y en polvo.

Para comprender mejor el papel decisivo que desempeña la lactancia materna en la reproducción convendrá examinar el tema desde una perspectiva evolutiva. Una de las claves del éxito de *Homo sapiens* ha sido el retraso del ritmo de reproducción de la especie, consecuencia del aplazamiento de la pubertad hasta bien entrada la segunda década de la vida (lo que no sucede en otros mamíferos) y de la prolongación del intervalo entre nacimientos sucesi-

vos debido al efecto contraceptivo de la lactancia materna.

Esas limitaciones a la reproducción abrieron nuevos horizontes a nuestra evolución. El desarrollo de un cerebro grande, incompatible con el parto a través del estrecho canal pélvico, debe realizarse después del nacimiento, lo que condiciona la dependencia total del hijo hacia su madre durante un largo período. El aplazamiento de la pubertad favoreció un dilatado período de infancia, proporcionando a los padres la oportunidad de transmitir al niño gran cantidad de conocimientos adquiridos. Es esta posibilidad de transmitir conocimientos, además de genes, la que confiere superioridad a la especie humana sobre los demás mamíferos.

Recordemos el medio ambiente en que se desarrollaron dichas restricciones reproductoras. La especie humana ha pasado más del 90 por ciento de su existencia llevando una vida nómada, de cazadores y recolectores. Aunque dicho modo de vida ha desaparecido en buena medida, el hombre sigue siendo, genéticamente, cazador-recolector; la "civilización" es demasiado reciente para que haya afectado de manera apreciable a la estructura genética.

Los indicios más representativos de este modo de vida ya desaparecido los encontramos en los estudios realizados sobre algunas de las escasas comunidades cazadoras-recolectoras que aún persisten en Africa, Australia, Nueva Guinea y Sudamérica. Una de las más estudiadas es la de los !Kung, del desierto de Kalahari, en el sur de Africa. Ha sido investigada por Richard Borshay Lee, de la Universidad de Toronto, e Irven DeVore, de Harvard, con ayuda de sus alumnos. Nancy Howell, de la Universidad de Toronto, ha demostrado que los !Kung, que no utilizan ningún tipo de contracepción moderno y no practican ninguna norma restrictiva de fertilidad, como son, por ejemplo, el matrimonio tardío, la prohibición del coito durante la lactancia o el infanticidio, tienen unas familias totales con una media de 4,7 hijos y un intervalo medio de 4,1 años entre cada nacimiento. Tomando en consideración la mortalidad, se calcula que serían necesarios unos 300 años para que se doblara la población.

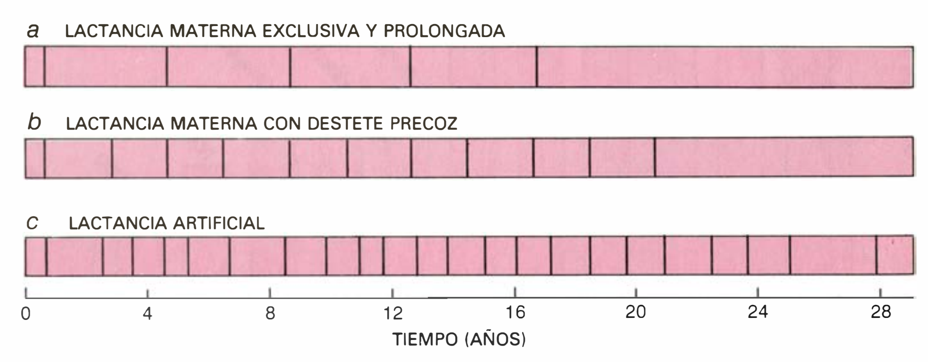
Prueba de que esos largos intervalos entre nacimientos los propicia la lactancia materna es que si el niño fallece y cesa la lactancia, la madre queda encinta al poco tiempo. Los estudios de Melvin Konner, de Harvard, y otros investigadores han demostrado que la madre carga con el niño a todas partes, y que éste duerme a su lado durante la noche. Durante el día, el niño se amamanta frecuentemente (unas cuatro veces por hora), aunque cada tetada no dura más de uno o dos minutos. También durante la noche el niño lacta a menudo, aunque la madre duerma. Si ésta tuviese hijos con mayor frecuencia, en vez de uno cada cuatro años, su libertad de movimiento quedaría muy restringida y, por tanto, la vida nómada sería imposible.

Aunque en principio tan elevada frecuencia de amamantamiento pueda parecer anormal, existen varias razones para suponer que quizá represente la pauta humana normal. Se ha descubierto una conducta similar entre los papúes cazadores-recolectores de Nueva Guinea. Conducta que estaría de acuerdo, además, con la composición bioquímica de la leche humana, de bajo contenido en grasas, proteínas y materia seca. Las especies que lactan a sus crías con menor frecuencia (vacas, ovejas, cabras, ciervos y conejos, entre otras) suelen tener una leche más nutritiva. Los parientes vivos más cercanos a la especie humana, el chimpancé y el gorila, también amamantan a sus crías varias veces por hora en su ambiente natural selvático, y secretan leche muy similar en su composición a la humana; también lactan de noche a sus crías y tienen un intervalo entre nacimientos de cuatro a cinco años.

No se conoce bien el mecanismo exacto por el cual el amamantamiento inhibe la fertilidad. Sin duda es el propio estímulo de succión, más que la secreción de leche, lo que constituye el factor decisivo. Las experiencias realizadas en ovejas y walabíes han demostrado que si se procede a la denervación quirúrgica del pezón sigue produciéndose secreción de leche, pero se pierde el efecto contraceptivo del amamantamiento.

Mi grupo ha demostrado que en la mujer aumenta considerablemente la sensibilidad del pezón a partir del alumbramiento, fenómeno que podría tener importancia para intensificar la transmisión de impulsos inhibidores hacia el cerebro. Se sabe que la succión del pezón durante el amamantamiento estimula una descarga refleja de la hormona oxitocina por parte del lóbulo posterior de la hipófisis; dicha hormona provoca la contracción de las células mioepiteliales que rodean los alvéolos mamarios, y, con ello, la expulsión de leche. La lactancia también estimula una descarga refleja de la hormona prolactina por parte de lóbulo anterior hipofisiario; se cree que dicha hormona desempeña un importante papel en el mantenimiento a largo plazo de la secreción láctea. Así, puede decirse que la oxitocina sirve la comida del día y la prolactina prepara la del día siguiente. Cuanto más frecuentemente la succión estimule el pezón, más elevado será el nivel de prolactina.

Las mujeres que padecen tumores hipofisiarios secretores de prolactina no suelen ovular y presentan amenorrea. En estos casos se observa una inhibición de la secreción de hormona luteinizante (hormona del lóbulo anterior de la hipófisis que provoca la ovulación). Si se extirpa quirúrgicamente el tumor, o se inhibe la secreción de prolactina administrando bromocriptina, se reanuda la secreción de hormona luteinizante en sus valores normales, lo que va seguido de una reinstauración de ciclos menstruales ovulatorios.



1. INTERVALOS ENTRE NACIMIENTOS observados en tres tipos diferentes de alimentación infantil en ausencia de métodos contraceptivos. Las mujeres de la tribu cazadora-recolectora !Kung de Africa (*a*) amamantan a sus hijos durante períodos de tres o cuatro años; presentan una media de 4,1 años de intervalo entre nacimientos y de 4,7 hijos nacidos vivos durante el período reproductivo activo de la mujer. Las hutteritas de Norteamérica (*b*), que amamantan a sus hijos siguiendo un rígido protocolo, les dan una alimentación suplementaria a los pocos meses de nacer, destetándolos dentro del primer año de vida; presentan un intervalo medio entre nacimientos de dos años y una media de 10,6 nacimientos vivos. Una mujer del Reino Unido (*c*) que nunca dio el pecho, y cuya lactación se suprimió administrándole estilbestrol o etinil-estradiol después de cada parto, presentó un intervalo entre nacimientos de 1,3 años.

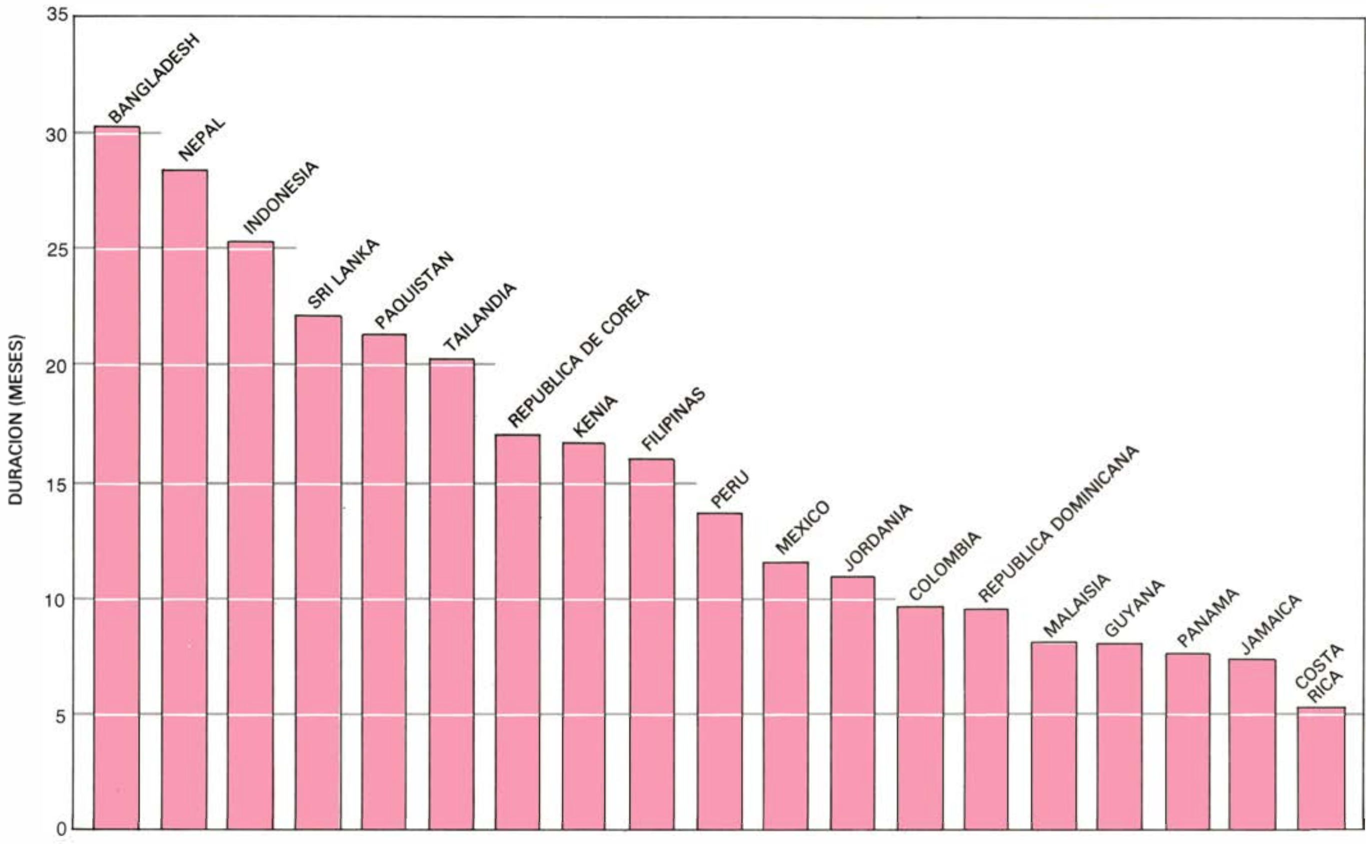
Esta sucesión de hechos ha dado origen a una teoría bastante difundida según la cual el elevado nivel de prolactina que se observa durante la lactancia inhibe la secreción de hormona luteinizante, y puede tener un efecto inhibidor directo sobre los ovarios, suprimiendo la ovulación. Punto de vista bastante discutible, si recordamos que en monos rhesus, a los que se les provoca la supresión de la secreción de prolactina mediante bromocriptina, no se produce ovulación si siguen amamantando a su cría. Por otra parte, las mujeres que presentan amenorrea debida a un exceso de fabricación de prolactina vuelven a tener una secreción normal de hormona luteinizante al tratarlas con naloxona, aunque los niveles de prolactina permanezcan elevados.

Más atractivo, por tanto, como hipótesis que explique el efecto contraceptivo de la lactancia materna, resulta aventurar que del pezón parten impulsos nerviosos hacia el hipotálamo, donde estimularían la secreción de beta-endorfina; parece que este neuropéptido suprime la descarga de hormona liberadora de gonadotrofina hipotalámica. Se favorecería así una disminución de la secreción de hormona luteinizante, con la consiguiente anulación de la ovulación.

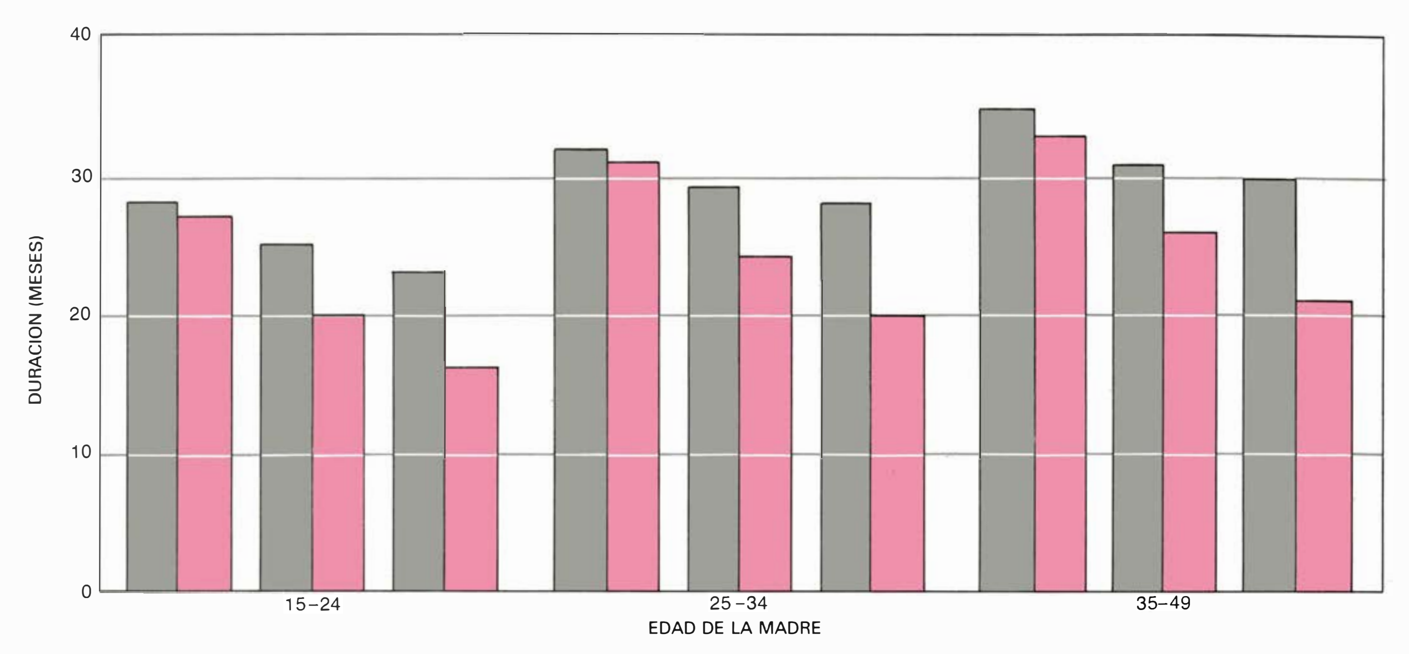
Estos mismos estímulos aferentes del pezón inhibirían también la secreción de dopamina por parte del hipotálamo y, dado que esta última sustancia suele regular la secreción de prolactina, se produciría un aumento inmediato del nivel de esta última. Así, el nivel de prolactina es un índice útil para medir el grado de inhibición hipotalámica inducido por la lactancia, pero probablemente no guarde relación directa con los factores que producen la inhibición de la ovulación.

Siendo evidente que el estímulo de succión constituye el factor decisivo para provocar el efecto contraceptivo, debe examinarse detalladamente la forma en que se lleva a cabo el amamantamiento para comprender lo que sucede. Peter W. Howie y Alan S. McNeilly, con quienes trabajé en el Consejo de Investigaciones Médicas de Edimburgo, estudiaron un colectivo de 27 mujeres escocesas que amamantaban a sus hijos durante todo el período de lactancia; las sometieron a control de actividad ovárica por determinaciones seriadas de estrógeno y pregnandiol urinario, y mantuvieron una rigurosa vigilancia de horarios y duración de cada tetada. Como grupo control, realizaron una investigación paralela en 10 mujeres que habían decidido alimentar a sus niños con lactancia artificial desde el período natal.

Los hallazgos de este estudio fueron muy interesantes. Se observó que, por término medio, las madres que daban biberón a sus hijos comenzaron a menstruar unas ocho semanas después del parto y a ovular a las 11 semanas, mientras que las que lactaban al pecho presentaron menstruación unas 33 semanas después del parto y, ovulación, en un tiempo medio de unas 36 semanas después del mismo. Ninguna mujer presentó ovulación si daba el pecho seis o más veces al día y durante más de 60 minutos por día; ninguna presentó ovulación mientras lactaba exclusivamente al pecho a su hijo sin ningún tipo de alimentación suplementaria. Al distribuir a las mujeres en dos grupos, uno que incluía a las que ovularon tardíamente (más de 40 semanas post-parto) y otro en que la ovulación se inició más precozmente (antes de las 30 semanas post-parto), se observó que el grupo de ovulación tardía amamantó durante un período más prolongado (una media de 53 semanas de lactación), amamantaba más a menudo, mantuvo el horario de alimentación nocturna durante más tiempo e introdujo la alimentación suplementaria más gradualmente. Al in-



2. DURACION DE LA LACTANCIA MATERNA en una selección de países en vías de desarrollo, apreciándose gran variación entre países. El trazado correspondiente a cada país indica el promedio de duración; como norma, las madres más jóvenes (de 15 a 24 años) amamantan a sus hijos durante menos tiempo que los grupos de madres de más edad, de 25 a 34 o de 35 a 49 años. Los datos los recopiló el Instituto Internacional de Estadística de Londres.



3. LAS MADRES RURALES Y URBANAS de Bangladesh difieren en cuanto al tiempo que dedican a la lactancia. En cada pareja de barras, el gris corresponde a las madres de origen rural y el color a las de procedencia urbana. En cada grupo de edad, la barra situada a la izquierda representa a las mujeres analfabetas, la del centro a las que recibieron educación primaria y, la de la derecha, a las que terminaron la educación secundaria. En buen número de países en desarrollo son las mujeres jóvenes, con educación y de origen urbano las que abandonan o reducen la lactancia materna.

troducirse la alimentación suplementaria, hacia las 16 semanas después del parto, se observó una notoria disminución de la frecuencia de las tetadas y del nivel sanguíneo de prolactina. A las 16 semanas de introducir la alimentación suplementaria, 20 de las 27 mujeres estudiadas iniciaron el desarrollo de folículos ováricos y 14 de ellas habían ovulado.

James B. Brown, de la Universidad de Melbourne, ha llevado a cabo un estudio similar, más extenso, en un grupo de 55 mujeres que lactaban, y que mantuvieron la lactancia materna por un período más prolongado que las mujeres del grupo de Edimburgo. Brown no pudo seguir con tanto detalle la conducta de amamantamiento. Combinando los resultados de los estudios de Edimburgo y Melbourne se pueden extraer ciertas conclusiones generales sobre la reanudación de la fertilidad después del parto.

En la mayoría de las mujeres que lactan al pecho se observa una inactividad ovárica que persiste durante gran parte del período de amenorrea lactacional. A medida que transcurre el tiempo, y coincidiendo con la introducción paulatina de alimentación complementaria, se observa una disminución del número y frecuencia de las tetadas y se reinicia la actividad ovárica cíclica. Así, la mayoría de las mujeres que amamantan comenzarán a menstruar y a ovular mientras aún dura el período de lactancia. Esta pauta explica por qué los profanos no consideran la lactancia materna un método fiable de contracepción.

Sin embargo, un análisis de los procesos endocrinos que preceden a esta primera menstruación después del parto, en los estudios realizados en Edimburgo y Melbourne, revela que, en la mayoría de los casos (58 por ciento), la mujer no presentaba ovulación antes de la menstruación. Es presumible que la menstruación se debiera a la degeneración de un folículo ovárico en desarrollo, lo que provocaba una caída de los niveles de estrógeno. En los casos donde la ovulación se daba antes de la primera menstruación, generalmente iba seguida de una fase lútea corta o deficiente. Parece poco probable que en tales mujeres el cuerpo lúteo del ovario, en caso de producirse la fecundación de un óvulo, pueda mantener un embarazo. Sólo en un 19 por ciento de los casos del estudio de Melbourne se presentó un ciclo ovulatorio normal antes de la primera menstruación después del parto.

Dado que la probabilidad máxima de concepción durante el ciclo menstrual normal es de alrededor de un 25 por ciento, los estudios anteriormente citados sugieren que sólo un 5 por ciento de las mujeres que lactan al pecho y reanudan el coito sin protección antes de la primera menstruación post-parto tienen probabilidades de quedar embarazadas. Dicha cifra coincide aproximadamente con la incidencia de embarazos durante la amenorrea lactacional (del 2 al 8 por ciento) que se observa en los países en vías de desarrollo. Aunque esta tasa de fallo contraceptivo durante la amenorrea lactacional puede parecer inaceptablemente elevada en los países desarrollados, debe recordarse que en el marco de un país del tercer mundo la protección proporcionada por los contraceptivos modernos no mejora notablemente los resultados, ya que muchas mujeres no los utilizan correctamente.

El estudio comparativo entre las mujeres de Edimburgo y Melbourne con las de la tribu !Kung pone de manifiesto varias diferencias sorprendentes. La mayoría de las primeras mencionadas habían destetado a sus hijos al año y medio del nacimiento, mientras que las mujeres !Kung amamantaban durante unos tres años y medio. De los grupos de Edimburgo y Melbourne, muy pocas amamantaban a sus hijos más de ocho veces cada 24 horas; en las mujeres !Kung, el número de tetadas en las 12 horas diurnas se elevaba a 48. (El tiempo total de amamantamiento –entre 100 y 150 minutos por día– probablemente fuera similar para todas las mujeres.)

Una diferencia particularmente importante era que las mujeres de Edimburgo y Melbourne abandonaban cuanto antes la alimentación nocturna, mientras que las mujeres !Kung dormían con sus hijos, lo que permitía la continuación de la alimentación nocturna durante todo el período de lactancia. Se sabe, por experiencias realizadas en ganado vacuno, que el intervalo

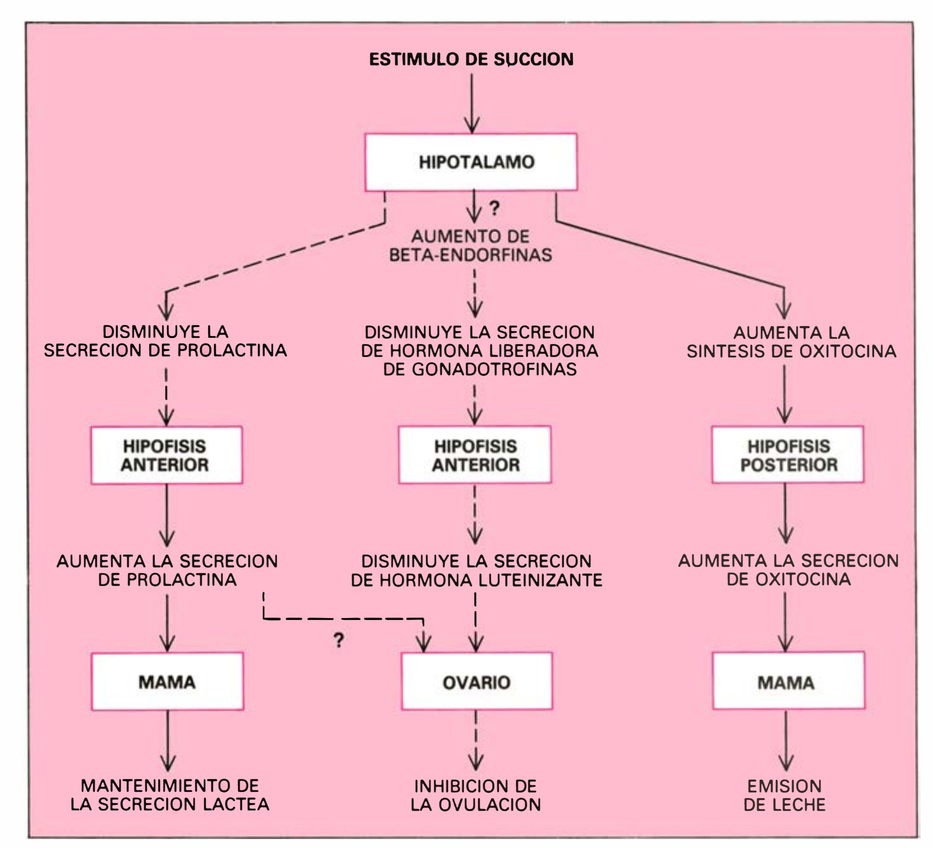
entre mamadas puede constituir un factor inhibidor de la ovulación post-parto de especial interés. Si al ternero se le deja mamar sólo durante 30 minutos al día, sigue un ritmo normal de crecimiento, pero la vaca reanuda el estro casi inmediatamente. Si les permitimos mamar a voluntad, las vacas presentan un largo período de inhibición lactacional del estro. Cabe inferir, pues, que el abandono de la lactancia nocturna por parte de muchas mujeres interrumpe, probablemente, la inhibición hipotalámica inducida, de una manera refleja, por la succión al pecho; por cuya razón se reanuda la actividad de los ovarios.

Hay quien atribuye a la desnutrición los prolongados períodos de amenorrea lactacional. Pero esa explicación no sería aplicable a las mujeres de Edimburgo y Melbourne, quienes presentaban un estado nutricional bueno en todos los casos. John Bongaarts, del Consejo Demográfico, quien ha revisado los datos provenientes de un buen número de países en vías de desarrollo, llega a la conclusión de que una malnutrición de grado moderado tiene un efecto mínimo sobre la amenorrea lactacional. Sin embargo, puede darse una sutil acción recíproca entre el estado de nutrición y la frecuencia de amamantamiento. Andrew S. Loudon, de la Universidad de Edimburgo, en un estudio realizado en ciervos comunes de Escocia, demostró que los ejemplares que pastan en montañas de escasa vegetación producen menos leche que los que se alimentan en zonas de prados permanentes. Los cervatillos desnutridos se amamantaban con mayor frecuencia, por lo que sus madres tenían niveles más elevados de prolactina, y reanudaban el estro más tardíamente que las alimentadas en prados.

Roger G. Whitehead y colaboradores, de la Unidad Dunn de Nutrición del Consejo de Investigación de Cambridge, llevaron a cabo un estudio en la República de Gambia en el cual se suministró alimentación suplementaria (700 kilocalorías por día) en forma de galletas de alto contenido calórico a mujeres desnutridas que lactaban al pecho. Whitehead observó que no se produjo aumento de la secreción láctea en dichas mujeres, pero sí subían los niveles de prolactina y se reanudaba antes la ovulación que en un grupo control, al que no se le suministró suplemento alimenticio. Observaciones que nos indican que, en el caso de una madre gravemente desnutrida que amamanta a su hijo, es preferible dar una alimentación suplementaria al niño, ya que la sobrealimentación materna no aumenta la secreción láctea.

Pero se trata de una indicación engañosa. Cualquier granjero dedicado a la lechería que no relacionara el nivel de nutrición con el rendimiento de leche de sus vacas estaría abocado a la quiebra. A la vista de los resultados obtenidos en el estudio realizado en ciervos comunes, es más probable que la alimentación suplementaria sí aumentara la secreción láctea en las mujeres del estudio de Gambia, y que dicho aumento se reflejara indirectamente en una disminución de la frecuencia de amamantamiento. (En el trabajo en cuestión no se realizaron registros precisos de la frecuencia de amamantamiento.) Se produjo entonces un descenso de los niveles de prolactina, con la consiguiente reiniciación precoz de la ovulación. Ante la opción de suplementar sólo la alimentación materna o la de suplementar la alimentación materna y la del niño, independientemente, hay que decidirse, sin titubeos, por la primera. Pues no sólo permitiría a la madre elaborar mayor cantidad del alimento ideal para su hijo, sino que contribuiría, además, a conservar el efecto contraceptivo del amamantamiento, por lo menos en parte. Se hace imperioso contar con mayor información sobre el efecto de la alimentación suplementaria en la producción de leche materna, ya que ésta constituiría la idea motriz de la ayuda a las poblaciones hambrientas del tercer mundo.

¿Cuándo debe agregarse la alimentación suplementaria a la dieta del lactante? Tradicionalmente se ha enfocado el problema estableciendo curvas de crecimiento infantiles "normales" (casi siempre recopiladas de niños alimentados con leches adaptadas de origen vacuno, o con leche humana pasteurizada) y determinando el momento en que el ritmo de crecimiento del niño amamantado se apartaba de la norma. Hay otro método: calcular la producción de leche de mujeres que lactan y determinar las necesidades energéticas del niño en fase de crecimiento, basándose en el valor calórico de la leche humana. Siguiendo este procedimiento, John C. Waterlow, de la Escuela de Higiene y Medicina Tro-



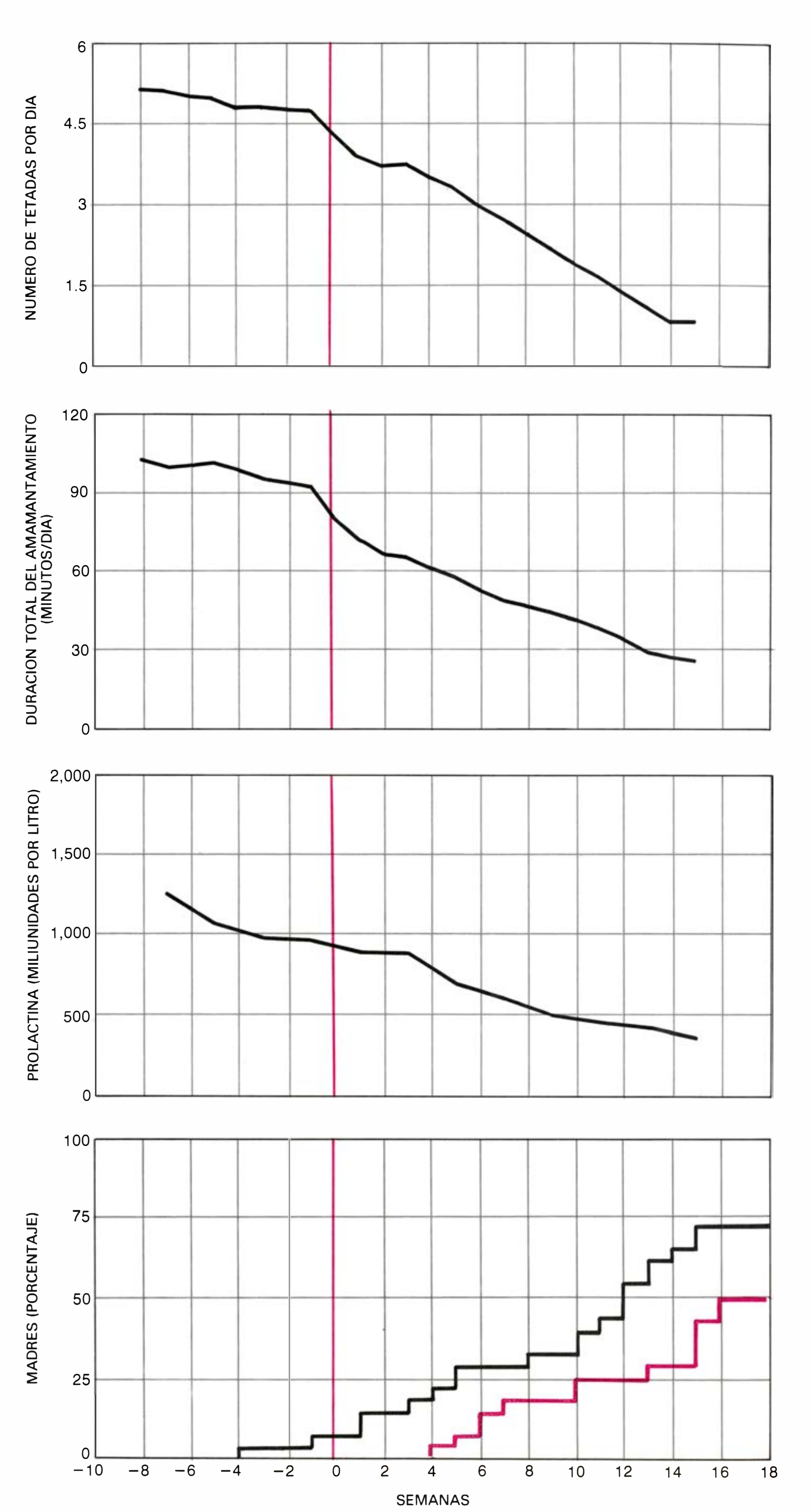
4. EFECTOS HORMONALES de la lactancia materna; según la hipótesis del autor, los desencadena el estímulo de succión al pecho. Aquí se indican algunas hormonas segregadas por el hipotálamo y la glándula hipofisaria. Los efectos estimulantes o de sinergia de una hormona se representan por flechas de trazo continuo. La inhibición hormonal, o de un proceso, está representada por flechas de trazo quebrado. La secreción de prolactina por la hipófisis suele inhibirse por la secreción de dopamina del hipotálamo; al disminuir el nivel de dopamina se incrementa, así, la liberación de prolactina. La oxitocina, que se sintetiza en el hipotálamo, alcanza, conducida a través de fibras nerviosas, el lóbulo posterior de la hipófisis y, de ésta, se libera al sistema circulatorio, con lo que se facilita la emisión láctea del pecho.

pical de Londres, concluyó recientemente que la lactancia materna no satisface por sí sola las necesidades energéticas de muchos lactantes a partir de los tres meses de edad. Como contrapartida, Chung H. Ahn y William C. MacLean, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, han demostrado que los hijos de madres participantes en el programa de La Lèche, que se alimentaron de forma exclusiva al pecho durante períodos que oscilaron entre los seis y los 12 meses, mostraron un desarrollo perfectamente normal, al menos durante los primeros nueve o diez meses.

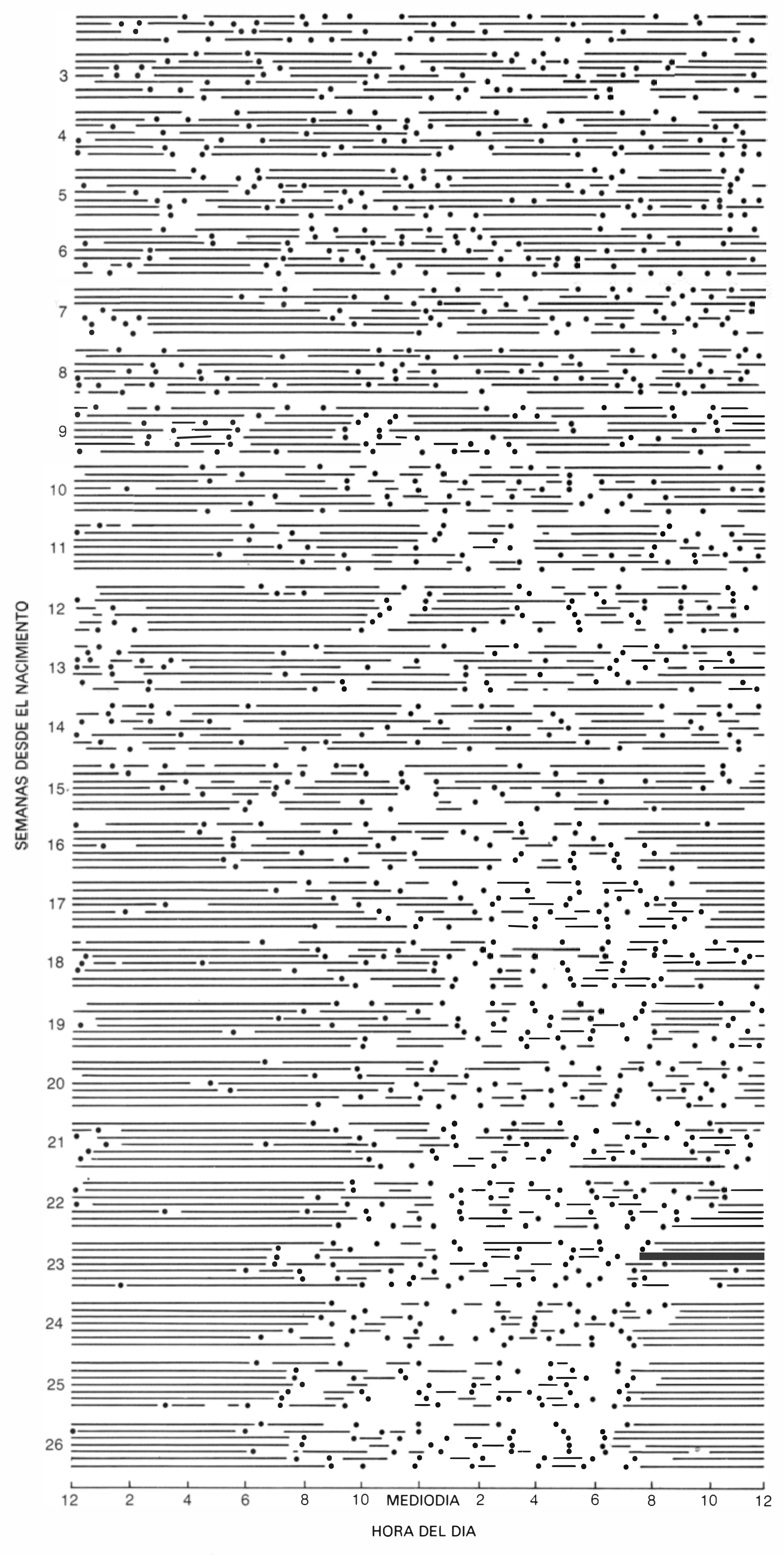
La necesidad o no de introducir alimentación suplementaria se deduce también de la inspección de la cavidad oral de los lactantes. El tiempo de erupción dentaria se estableció en el curso de la evolución como medio para dotar al lactante de una forma alternativa de autoalimentación, en una fase apropiada del desarrollo. Los cazadores-recolectores no tenían acceso a los alimentos especiales para niños; cuando se destetaban, recibían inmediatamente los mismos alimentos que tomaban los adultos, que precisaban de masticación. Dado que los dientes incisivos no aparecen hasta los seis meses después del parto, y que no existe oclusión dentaria hasta los nueve o diez, puede considerarse éste el momento de iniciar la alimentación suplementaria.

Es un error subestimar el potencial de secreción láctea de los humanos, que se cifra en unos 700 mililitros por día cuando el niño tiene seis semanas, incrementándose a unos 800 mililitros a partir del tercer mes. No obstante, Peter E. Hartmann, de la Universidad de Australia Occidental, ha demostrado que las mujeres de su país que alimentan exclusivamente al pecho a sus hijos con el sistema "a demanda" por períodos de hasta 15 meses segregan hasta 1500 mililitros por día. En el caso de mellizos la secreción supera los 2500 mililitros. Así, la glándula mamaria constituye un espléndido órgano de aprovisionamiento a demanda: cuanto más a menudo se le extrae leche, más leche produce. Este fenómeno probablemente responda a algún mecanismo intraalveolar mediante el cual la dilatación alveolar debida a la presencia de leche inhibe, por sí misma, una mayor síntesis láctea; se desconoce, sin embargo, el funcionamiento preciso del mecanismo.

En muchos países, desarrollados o no, suele darse que la madre inicie la alimentación suplementaria del niño a



5. LA ALIMENTACION SUPLEMENTARIA suministrada al niño que lacta al pecho entre las tres y 24 semanas después del parto tiene numerosos efectos. Aquí, los resultados se centran en el tiempo de introducción de suplementos, representado por la línea vertical de color. Los efectos indicados son, de arriba abajo: número de tetadas por día, tiempo total de amamantamiento diario, nivel de la hormona prolactina en el sistema circulatorio y ovarios maternos y, por último, porcentaje de mujeres que presentan un aumento de la síntesis de estrógenos ováricos y ovulación, según un estudio seguido en 27 madres.



6. CICLOS DE ALIMENTACION de un niño que lacta al pecho registrados desde el 11º hasta el 182º día de vida. Las líneas continuas representan los períodos de sueño, los puntos indican las tetadas y, los espacios en blanco, los períodos de vigilia. Es evidente que la madre ha acostumbrado progresivamente al niño a renunciar a la alimentación nocturna, por lo que se merma el efecto contraceptivo de la lactancia.

muy temprana edad, en ocasiones desde el mismo día del nacimiento. Esta práctica sólo sirve para disminuir la provisión de leche materna, exponer al lactante a un riesgo innecesario de infección y minar el efecto contraceptivo de la lactancia al pecho. Además, existen datos recientes que demuestran que la introducción de alimentos suplementarios en los primeros cuatro meses de vida pueden favorecer la aparición de un eccema infantil. Sería mucho más sensato fomentar, entre las madres, la alimentación materna exclusiva del niño, por lo menos durante los seis primeros meses, y que éstas suplementaran su propia alimentación durante dicho período, en vez de suministrar alimentación adicional al pequeño.

Es objeto de polémica también qué tipo de contraceptivo debería usar la madre durante la lactancia y cuándo debiera comenzar a usarlo. En los países industrializados, donde las mujeres generalmente amamantan por poco tiempo, y donde se da por supuesto el acceso a algún método infalible de contracepción, suelen recomendarse los métodos de barrera, el dispositivo intrauterino, o la "minipíldora", de composición exclusivamente gestagénica, a partir del mes siguiente al parto. (La píldora anticonceptiva de uso corriente contiene una combinación de estrógeno y progestágeno; en la "minipíldora" se suprime el estrógeno, ya que éste inhibe la lactancia.)

En los países en vías de desarrollo, donde las mujeres lactan al pecho durante períodos bastante más prolongados, y donde tanto la provisión como la posibilidad de utilizar contraceptivos están muy limitadas, la situación cambia por entero. Como ya indiqué antes, aquí el efecto contraceptivo de la amenorrea lactacional resulta al menos tan eficaz como cualquier tipo de contraceptivo moderno. La amenorrea lactacional perdura durante un año o más, por lo que no está justificada la introducción de un sistema de "doble protección" durante dicho período. Más aún, en un estudio realizado en Bangladesh se apunta hacia un posible aumento de la fertilidad en mujeres lactantes con la introducción de la píldora anticonceptiva de doble componente, ya que su efecto inhibidor sobre la secreción láctea adelantaría el proceso de destete. Por otro lado, muchas mujeres ya habrían abandonado la píldora antes de llegar al destete, con lo cual se habría perdido todo tipo de protección contra el embarazo.

Para las mujeres que lactan al pecho en los países en vías de desarrollo, uno

de los anticonceptivos más seguros, y el de más sencilla administración, es el Depo-Progevera (acetato de medroxiprogesterona). Se trata de un progestágeno que se administra en forma inyectada en dosis única cada tres meses, tiempo durante el cual suprime ovulación y menstruación. El tiempo ideal para su administración sería en las últimas fases de la lactancia, justo antes de reanudarse la menstruación.

Nos adentramos aquí en un tema muy controvertido. Los numerosos estudios realizados por la OMS aún no han podido detectar ningún peligro para la salud con el uso del Depo-Progevera, ni tampoco efectos adversos sobre la composición y secreción de la leche materna. Pero, por otro lado, las autoridades sanitarias de muchos países industrializados se oponen a la utilización del Depo-Progevera, pues aún no se ha comprobado de forma concluyente que carezca de efectos secundarios adversos. Ante la oposición de las asociaciones de consumidores, la Administración para el Control de Alimentos y Drogas de los Estados Unidos ha aplazado su decisión sobre la aprobación de este preparado para uso anticonceptivo en ese país; se ha elevado recurso sobre el caso. De momento no puede incluirse el Depo-Progevera en los programas de control de natalidad financiados por la Agencia Norteamericana para el Desarrollo Internacional.

El Ministro de Salud británico rechazó las recomendaciones de su Comité de Control de Medicamentos, por razones "no médicas" sin especificar, y se negó a aprobar al Depo-Progevera como anticonceptivo. La Junta Nacional Sueca de Salud y Bienestar ha dado su aprobación al uso de este específico como anticonceptivo, autorizando su administración, incluso por comadronas, dentro del territorio sueco, pero la Organización Sueca de Desarrollo Internacional ha retirado toda financiación para su distribución internacional. El Ministerio Federal de Salud de la República Federal de Alemania aprobó recientemente el empleo de Depo-Progevera para las mujeres lactantes, revocando su decisión anterior de prohibir el preparado debido a "la posibilidad de riesgo no justificable para la salud". El Comité Australiano de Evaluación de Medicamentos ha proscrito el uso de Depo-Progevera como contraceptivo ante "la falta de pruebas clínicas", a pesar de que aproximadamente un millón y medio de mujeres lo utilizan en todo el mundo.

Uno de los motivos sobre el que se fundan los recelos relativos a su empleo es el riesgo potencial de la presencia de pequeñas cantidades de progestágeno en la leche materna y su consecuente absorción por el lactante. Sin embargo, los niños alimentados artificialmente con leche de vaca o leches adaptadas de la misma procedencia están también expuestos a la ingesta de pequeñas cantidades de esteroides, pues gran número de vacas están preñadas al ordeñarlas; y sabido es que la leche constituye una de las vías de excreción de los altos niveles de progesterona y sulfato de estrona que se producen durante la gestación. Paradójicamente, cuando una madre que lacta queda embarazada, su leche también contiene progesterona y estrógeno (situación para la que se diseñó específicamente como antagonista el Depo-Progevera). Sería más conveniente para todos los interesados que las entidades pertinentes aprobasen el uso de Depo-Progevera como contraceptivo y prohibiesen todo tipo de alimentación basado en productos derivados de la leche de vaca.



7. **VASIJAS ANTIGUAS PARA LA ALIMENTACION de lactantes, que atestiguan que la tendencia a abandonar la lactancia materna comenzó hace mucho tiempo. Estas vasijas de cerámica se encuentran en la colección del Instituto Wellcome de Historia de la Medicina, de Londres. La de la izquierda procede de Chipre y data del siglo x a. C., aproximadamente; la de la derecha, del siglo cuarto o tercero a. C., provienen del sur de Italia. Probablemente se les adaptara un pequeño trozo de esponja en la espita.**

Una razón por la cual es vital la ingesta continuada de leche materna para la salud infantil en los países en vías de desarrollo tiene que ver con el paso de células sanguíneas de la serie blanca del intestino al pecho. Esa vía de transmisión se descubrió en el último decenio. Las placas de Peyer (unas grandes masas de tejido linfático intestinal, situadas en el intestino delgado) contienen células inmunocompetentes sensibilizadas a los patógenos intestinales a los que ha estado expuesta la madre durante su vida. Si la madre ingiere alguno de esos patógenos durante la lactancia, células sensibilizadas emigran de las placas de Peyer a la circulación sistémica, de donde se dirigen al tejido mamario, transformándose aquí en células plasmáticas que liberan una inmunoglobulina *A* específica frente al patógeno y que se secreta en la leche. Dicho proceso se ve favorecido por un nivel elevado de prolactina en el torrente circulatorio.

Durante el cuarto mes de lactancia una mujer puede secretar hasta 0,5 gramos de anticuerpo en su leche cada día. El lactante no absorbe el anticuerpo, sino que éste permanece en la luz intestinal, donde desempeña un papel crucial en la prevención de infecciones gastrointestinales (la principal causa de mortalidad infantil). Ninguna leche de formula adaptada, aun cuando se haya puesto el máximo ingenio en su elaboración, puede remplazar a esta protección inmunológica "hecha a medida" que confiere la leche materna.

La continua disminución de la lactancia materna constituye una auténtica tragedia para la humanidad. Ha sido la causa simultánea de una estimulación excesiva de la fertilidad y de un notable incremento de la mortalidad infantil. Nuestros conocimientos son más que suficientes para evitar la repetición de ese drama en los países en vías de desarrollo. El reto actual consiste en transformar los conocimientos en acción directa.

Nubes moleculares, formación de estrellas y estructura galáctica

Las radioobservaciones muestran que las nubes gigantes de moléculas donde nacen las estrellas se distribuyen, de manera desigual, en las galaxias espirales. Ello quizás explique las variaciones que se registran en su apariencia óptica

Nick Scoville y Judith S. Young

Aunque la mayoría de las estrellas visibles en el cielo nocturno se formaron hace más de mil millones de años, el de creación de estrellas es un proceso que continúa. Gran parte de la fascinación que ejerce el universo tiene que ver, de una u otra manera, con el número relativamente pequeño de estrellas mucho más jóvenes. Los miembros de mayor masa y vida más corta de cada generación estelar presentan particular interés. En su juventud, suministran energía a las nebulosas fluorescentes que tachonan los brazos espirales de galaxias como la nuestra. Al morir, explotan espectacularmente en forma de supernovas, rellenando el espacio interestelar con una mezcla de gases que incluye una fracción enriquecida de elementos pesados. De esas cenizas surgirán las futuras generaciones de estrellas. A raíz, sobre todo, de las observaciones realizadas con radiotelescopios, ha ido quedando claro, a lo largo de los últimos años, que las fuentes de este rejuvenecimiento son las nubes moleculares gigantes; miden éstas más de cien años-luz de diámetro y encierran una masa de materiales gaseosos de hasta un millón de veces la solar. Dentro de esos inmensos capullos, en el seno de la fría y polvorienta oscuridad, tiene lugar la metamorfosis de las estrellas.

Aunque se sabe que las nubes gaseosas gigantes son lugares fértiles para la formación de estrellas, llama la atención que no se hayan transformado totalmente en éstas. Hoy, transcurridos más de 10.000 millones de años desde el nacimiento de nuestra galaxia, pueden verse todavía muchas estrellas jóvenes emergiendo de las nubes donde nacieron. Aisladas del entorno galáctico, las nubes colapsarían por su propio peso, transformando su gas difuso en estrellas en menos de 10 millones de años. Si la formación de estrellas fuese inevitable, requiriéndose sólo que una adecuada masa de materia estuviera acumulada en la nube, la provisión de gas interestelar necesario para nutrir la próxima generación de estrellas se habría reducido, hace tiempo, a la insignificancia. De lo que se infiere que existirá una sutil interacción entre las nubes y su entorno galáctico que regule, de manera eficaz, la formación de estrellas. Uno de los capítulos más excitantes de la astrofísica contemporánea ha sido el trabajo observacional y teórico realizado para determinar qué papel desempeñan las nubes moleculares gigantes en la evolución galáctica y qué relación media entre la formación de estrellas y la estructura en gran escala de las galaxias.

La proporción de estrellas jóvenes varía grandemente de una galaxia a otra y de un lugar a otro de la misma galaxia. En las espirales, así la nuestra, los brazos brillan bastante en las fotografías tomadas con luz visible en virtud de la concentración de estrellas jóvenes y de gran masa a lo largo de los mismos. Aunque tales estrellas tienen una vida comparativamente corta (menos de 10 millones de años), su ritmo de emisión de radiación puede multiplicar un millón de veces el solar. De aquí que sus lugares de nacimiento aparecerán brillantemente iluminados durante algunos millones de años. Característica sobresaliente de las galaxias espirales, que reconociera ya hace 40 años Walter Baade, del Observatorio del Monte Wilson, es la correlación aparente en la posición de las estrellas de gran masa, de suerte que se percibe una configuración espiral en gran escala. Los brazos brillantes pueden seguirse a veces hasta una vuelta completa, que abarca una distancia de tal vez 200.000 años-luz.

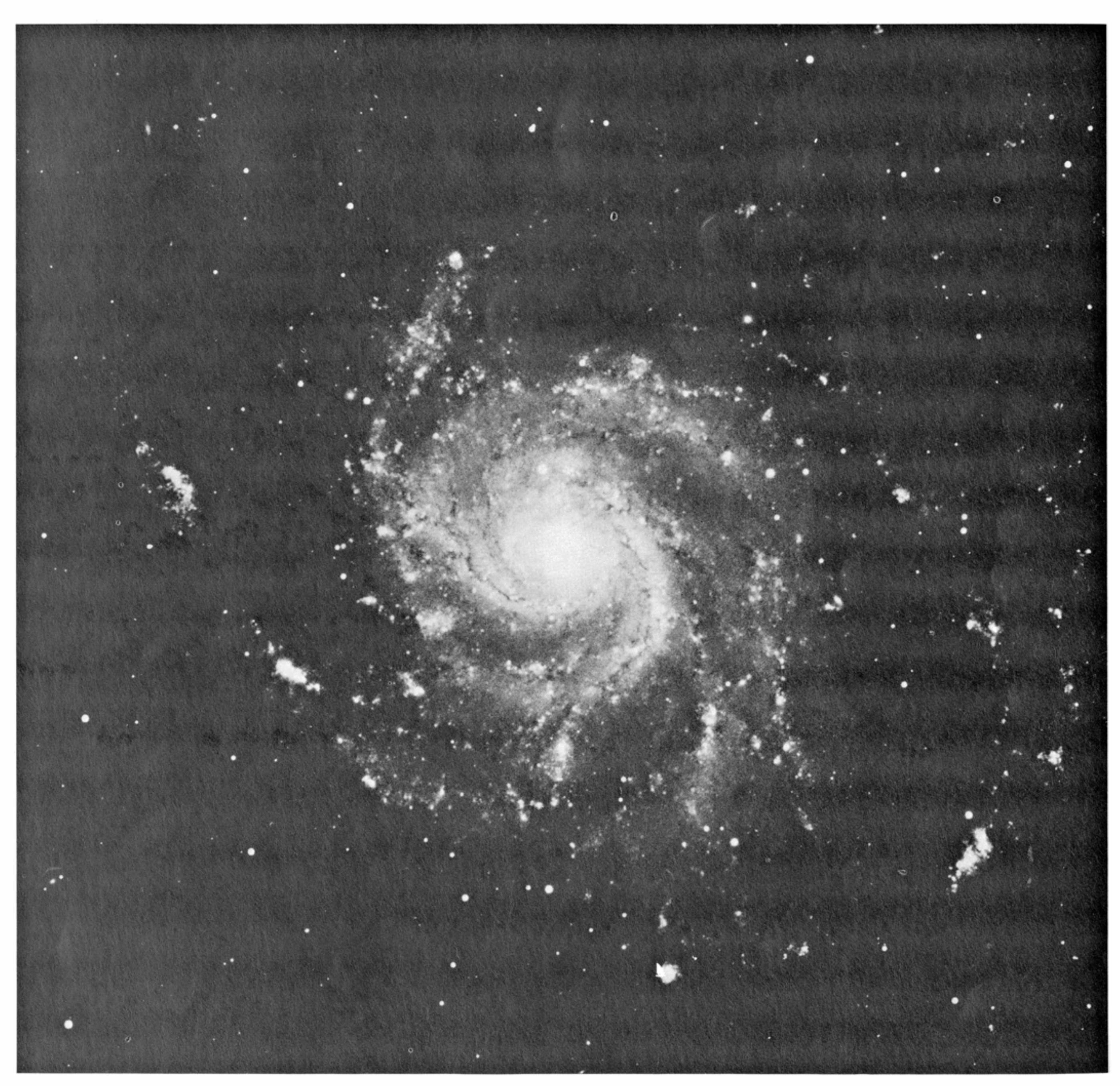
¿Por qué puede correlacionarse la formación de estrellas de gran masa en la totalidad del disco galáctico, distancia muy por encima de los efectos físicos de una nube sobre otra o de la esfera de influencia de una estrella individual? Se han dado dos explicaciones. Chia-Chiao Lin y Frank H. Shu, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, propusieron, en primer lugar, que esas configuraciones en gran escala eran ondas de densidad, generadas por las interacciones gravitatorias colectivas de miles de millones de estrellas del sistema galáctico o por la marea atractiva de una galaxia próxima. Más recientemente, Philip E. Seiden y Humberto C. Gerola, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de la IBM, han sugerido otra hipótesis: la formación de estrellas se propagaría por la superficie de la galaxia a la manera de los incendios forestales, es decir, la formación de estrellas de gran masa en un punto desencadenaría la formación de otras estrellas en nubes adyacentes. (Cabe una tercera posibilidad, según la cual habría nubes y se formarían estrellas en todo el disco galáctico, si bien sus propiedades variarían cerca de los brazos espirales para originar, preferentemente allí, las estrellas de mayor masa.)

Los astrónomos llevaban años identificando las nubes gaseosas próximas al sistema solar como lugares de formación activa de estrellas. Sin embargo, hasta hace poco no se había podido presenciar el proceso real de nacimiento. Una pequeña proporción de polvo en las nubes, que constituye aproximadamente el uno por ciento de su masa, absorbe de una manera eficaz la radiación solar visible y ultravioleta procedente de las jóvenes estrellas inmersas en todas las nubes salvo en las más tenues. Las partículas microscópicas de polvo constan de carbono (en forma de grafito), silicatos y otros compuestos similares a rocas terrestres y lunares.

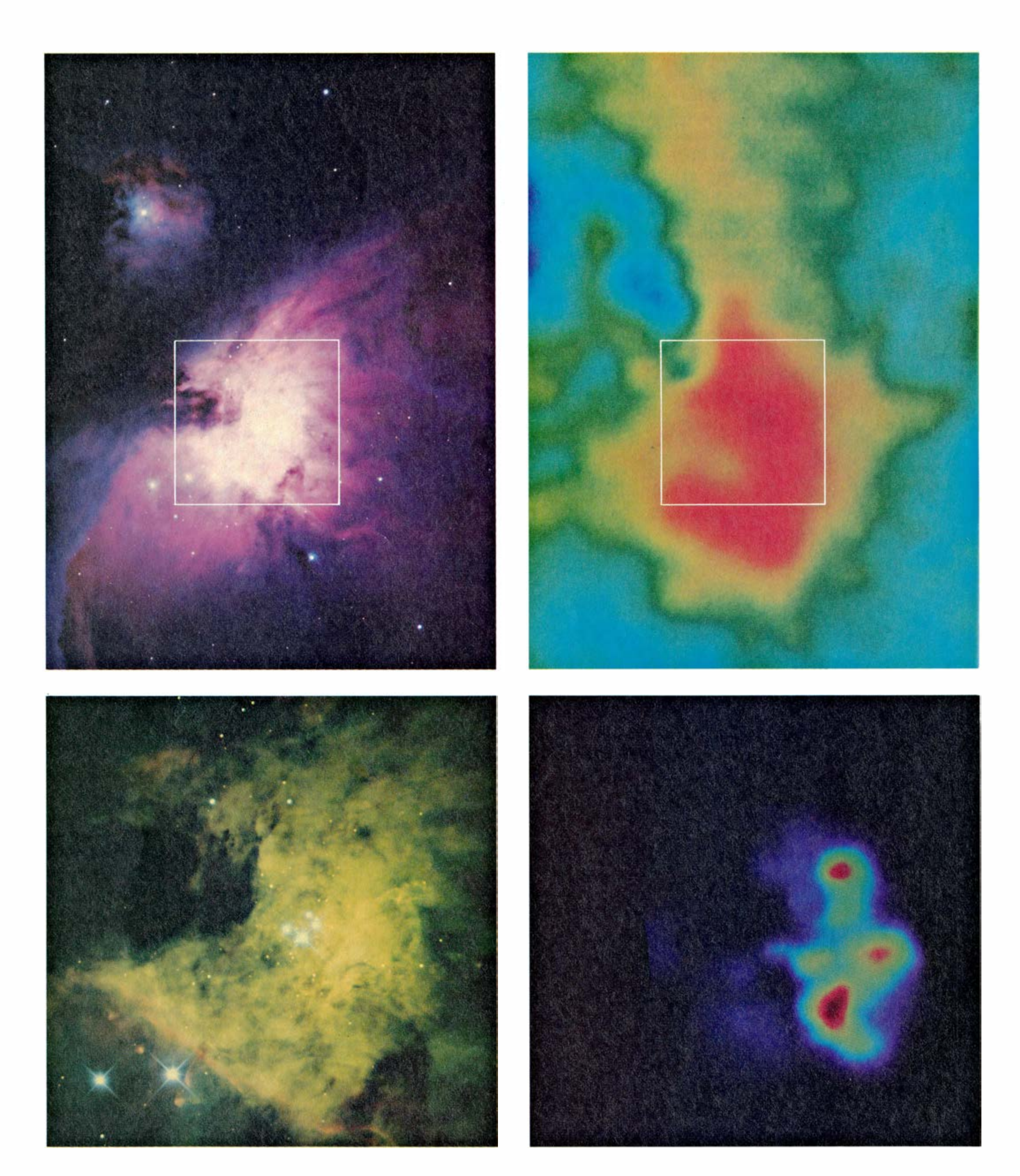
Aunque el polvo del espacio interestelar se halla enrarecido, se distingue sin mayor dificultad cuando uno contempla la Vía Láctea en una noche oscura. El disco de nuestra galaxia no se nos ofrece entonces en la banda de estrellas, única y suave, que atraviesa el cielo, sino en dos bandas con un vacío oscuro entre ellas. La escisión se debe a que la luz de las estrellas más distantes de la galaxia es absorbida por nubes de gas y polvo situadas en la parte anterior a lo largo de la visual.

La capa de polvo galáctico cuya silueta destaca del fondo de estrellas tiene un espesor de unos 300 años-luz. Por culpa del polvo no se ha podido ver estrellas recién nacidas antes de que se separasen lo suficiente de la nube que las ocultaba o hasta que liberasen suficiente energía para dispersarla. A medida que las estrellas envejecen, interaccionan gravitatoriamente con las nubes interestelares, enormes, aumentando gradualmente la distancia hasta la parte exterior a la que son lanzadas desde el disco galáctico, donde habrán de volver a caer. De ello resulta que, si bien la mayor parte de las estrellas se formaron probablemente de nubes de gas en el delgado disco, el espesor de la capa estelar más antigua ha aumentado hasta unos 1000 años-luz.

Se reconoce en la Gran Nebulosa de Orión uno de los principales viveros de estrellas de nuestra galaxia. Bastan unos gemelos para contemplar esta luminosa nebulosa en medio de la daga que pende del cinturón de Orión. Los astrónomos saben que la brillante emisión de la nebulosa, cuyo estudio comenzó hace más de un siglo, es una manifestación de la fase final del proceso de formación de estrellas. Cerca del



1. GALAXIA ESPIRAL, designada por M101 en el catálogo de Messier de grandes objetos celestes, vista casi en planta en esta fotografía, obtenida con el telescopio reflector de cuatro metros del Observatorio Nacional de Kitt Peak. Con una distancia estimada de unos 20 millones años-luz, cubre una distancia transversal de unos 300.000 años-luz. Los brazos espirales están iluminados por las brillantes regiones H II de hidrógeno ionizado, que las estrellas jóvenes de gran masa inmersas en ellas calientan hasta la fluorescencia. Los filamentos oscuros de los brazos espirales son bandas de polvo. El núcleo galáctico, pequeño en comparación, y los brazos relativamente abiertos convierten a M101 en un ejemplo típico de una galaxia *Sc* [*véase la figura* 5]. Las radioobservaciones de moléculas de monóxido de carbono (CO) en la vecindad de M101 revelan que las nubes moleculares formadoras de estrellas se concentran hacia el centro, extendiéndose hacia fuera hasta un radio de unos 40.000 años-luz. Otros tipos principales de galaxias son las *Sa, Sb* y *Sd*.



2. CUATRO VISTAS DE LA NEBULOSA DE ORION. La fotografía superior izquierda se obtuvo con el telescopio de cuatro metros de Kitt Peak. La imagen en falso color generada por ordenador de la parte superior derecha, que cubre la misma región del cielo, se realizó a partir del registro de radioondas emitidas por las moléculas de monóxido de carbono en la vecindad de la nebulosa; los datos de CO se recogieron con el radiotelescopio de 14 metros del Observatorio de Radioastronomía del Five College en Massachusetts. La fotografía inferior izquierda, tomada con el telescopio de tres metros del Observatorio Lick, nos ofrece una visión algo más detallada de la parte central de la nebulosa, limitada por los encuadres en las dos figuras de arriba. Esta fotografía más detallada, que se obtuvo mediante un filtro que permite preferentemente el paso de la luz verde emitida por átomos de oxígeno ionizados una vez, revela el grupo central de luminosas estrellas jóvenes, conocido colectivamente como cúmulo del Trapecio, responsable de la fluorescencia de la nebulosa. La correspondiente imagen de la región central de la nebulosa en la parte inferior derecha se realizó mediante el telescopio infrarrojo de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) en Mauna Kea, Hawai. Las manchas brillantes en la imagen infrarroja representan las estrellas más jóvenes de la nebulosa, todavía inmersas en el polvo central y, por tanto, aún invisibles. Los datos infrarrojos fueron obtenidos por Gareth Wynn-Williams y Eric E. Becklin, de la Universidad de Hawai, Reinhart Genzel, de la Universidad de California, y Dennis Downes, de Grenoble.

centro de emisión de la nebulosa encontramos el cúmulo de estrellas del Trapecio, con varios individuos jóvenes de gran masa. La estrella de mayor masa emite energía a un ritmo 100.000 veces superior al del Sol. Una fracción apreciable de la radiación cae en la región ultravioleta del espectro y, por tanto, tiene energía suficiente para arrancar electrones del hidrógeno atómico, con lo que ioniza el hidrógeno del gas circundante. La brillante emisión visible, característicamente de color rosáceo, es, en realidad, luz fluorescente a una longitud de onda de 6563 unidades angstrom, emitida por el hidrógeno ionizado cuando se recombina al capturar un electrón libre.

Este ciclo de ionización y recombinación se repite para la totalidad de la nebulosa unas 10^{50} veces por segundo. Así, pese a distar 1700 años-luz del sistema solar, esa región se ve brillantemente iluminada. En el gas nebular, la ionización de los átomos de hidrógeno ocurre unas 1000 veces más deprisa que el proceso inverso: la recombinación de electrones y protones para formar átomos de hidrógeno. De aquí que exista en la nebulosa un estado de equilibrio de ionización, con una concentración de electrones y protones unas 1000 veces superior a la del hidrógeno atómico neutro (no ionizado). Las regiones similares a la nebulosa de Orión, donde la mayor parte del gas está ionizado, se designan por regiones H II; son las nebulosas brillantes que contornean los brazos espirales de las galaxias.

Una de las regiones H II más cercanas, la nebulosa de Orión, se ha convertido en verdadera piedra de Rosetta para los estudios de la formación de estrellas y los procesos físicos asociados. Explorando la anchura de la nebulosa visible, pueden observarse aglomeraciones estacionarias y corrientes de alta velocidad de plasma (gas ionizado). Alejándose más del cúmulo del Trapecio, se llega a alcanzar el punto donde los fotones ultravioleta emitidos por las cuatro estrellas del Trapecio se han agotado ionizando el gas. Más allá de este radio, el hidrógeno no puede mantenerse ya ionizado. Hasta hace poco, la región del hidrógeno ionizado era la única parte de la nebulosa susceptible de observación. La fuerte atenuación debida a los granos de polvo mezclados con el gas neutro nos celaba el interior de la nube.

Los progresos registrados en astronomía del infrarrojo y en radioastronomía de ondas milimétricas han mostrado que las observaciones primitivas a longitudes de onda del espectro visible apenas si revelaban la punta del témpano de hielo. La radiación infrarroja y de ondas milimétricas resultan mucho menos atenuadas por el polvo. La primera posibilita la detección de estrellas inmersas en el polvo; la segunda proporciona un medio de observación del gas molecular. Los datos del infrarrojo son, en cierto sentido, un negativo de la imagen óptica, ya que el polvo que absorbe la luz visible reemitirá posteriormente su exceso de energía en longitudes de onda del infrarrojo. Así, en la porción infrarroja del espectro se ven emisiones brillantes asociadas a estrellas luminosas inmersas en la nube de polvo; se ve la energía reemitida por el polvo cercano que se ha calentado, raramente se ve la estrella misma. Las observaciones de la nebulosa de Orión en el infrarrojo han revelado dos cúmulos de estrellas jóvenes sumergidas en la nube neutra. Merece destacarse el hecho de que ninguno de esos dos apareciese, ni siquiera débilmente, en las fotografías de la región hechas con luz visible; en efecto, uno de los cúmulos emite, al parecer, energía en forma de radiación infrarroja a un ritmo casi idéntico al del cúmulo del Trapecio, 100.000 veces el ritmo a que lo hace el Sol.

En el interior de la nube situada tras la nebulosa de Orión, el gas adquiere la densidad suficiente y la baja temperatura necesaria para que los átomos se hayan enlazado formando moléculas. Aquí, donde la temperatura media no llega a 100 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto), predomina el hidrógeno molecular, H_2. Abundan también moléculas trazas de monóxido de carbono (CO), cianógeno (CN) y amoníaco (NH_3). A las temperaturas que suelen reinar en las nubes, el hidrógeno molecular no es directamente observable. Los estudios del gas frío se han apoyado en las moléculas escasas; a diferencia del H_2, emiten y absorben radiación a longitudes de onda corta de radio y en la porción infrarroja lejana del espectro. Una importante fase en nuestro conocimiento de las nubes creadoras de estrellas se abrió hace 15 años, cuando Robert W. Wilson, Keith B. Jefferts y Arno A. Penzias, de los Laboratorios Bell, detectaron emisiones de monóxido de carbono en la nube de Orión. Desde entonces se ha identificado en aquellas regiones unas 60 moléculas, con una complejidad que aumenta hasta el cianopentacetileno ($HC_{11}N$). La lista incluye el ácido fórmico (HCOOH), el formaldehído (H_2CO) y el etanol (C_2H_6O). Al no abundar tanto como el CO, las moléculas más complejas pueden, por lo general, detectarse sólo en el núcleo compacto de las nubes, donde el gas adquiere mayor densidad.

El monóxido de carbono sigue siendo el mejor trazador del gas molecular en grandes zonas. En la Vía Láctea, la densidad media del gas interestelar se cifra alrededor de un átomo por centímetro cúbico. Las nubes moleculares, que constituyen, en comparación, las partes densas del medio interestelar, tienen unos valores característicos que van desde cientos hasta miles de moléculas por centímetro cúbico, lo que todavía resulta la trillonésima parte de la densidad de la atmósfera terrestre al nivel del mar. Dentro de las nubes, el monóxido de carbono viene a corresponder a una molécula por cada 10.000 de hidrógeno.

El enlace de una molécula del tipo del monóxido de carbono obedece a que los electrones más externos de los átomos de oxígeno y carbono son compartidos por ambos; cada electrón pasa cierto tiempo cerca del otro átomo. Como los electrones no se comparten en forma exactamente equitativa, hay una pequeña carga positiva neta en un extremo de la molécula y una carga negativa similar en el otro. La atracción entre las cargas opuestas mantiene unidos a los átomos.

La radiación molecular detectada procedente de las nubes interestelares nace de las variaciones ocurridas en la rotación de la molécula en conjunto. Las rotaciones permitidas están cuantificadas, es decir, no son continuas. Cuando la molécula de monóxido de carbono cambia de una velocidad de rotación dada a otra inferior, radia un fotón, un cuanto de radiación electromagnética, con una energía igual a la reducción de la energía de rotación. Una transición del primer estado excitado de energía del monóxido de carbono al estado fundamental origina un fotón con una longitud de onda de 2,6 milímetros, correspondiente a una frecuencia de radio de 115.000 megahertz. Por tener cada especie molecular una estructura ligeramente diferente, cada una radiará a un conjunto único de frecuencias. Sus "huellas dactilares" espectrales son bien definidas e identificables en la banda de longitudes de onda milimétricas, corta en comparación.

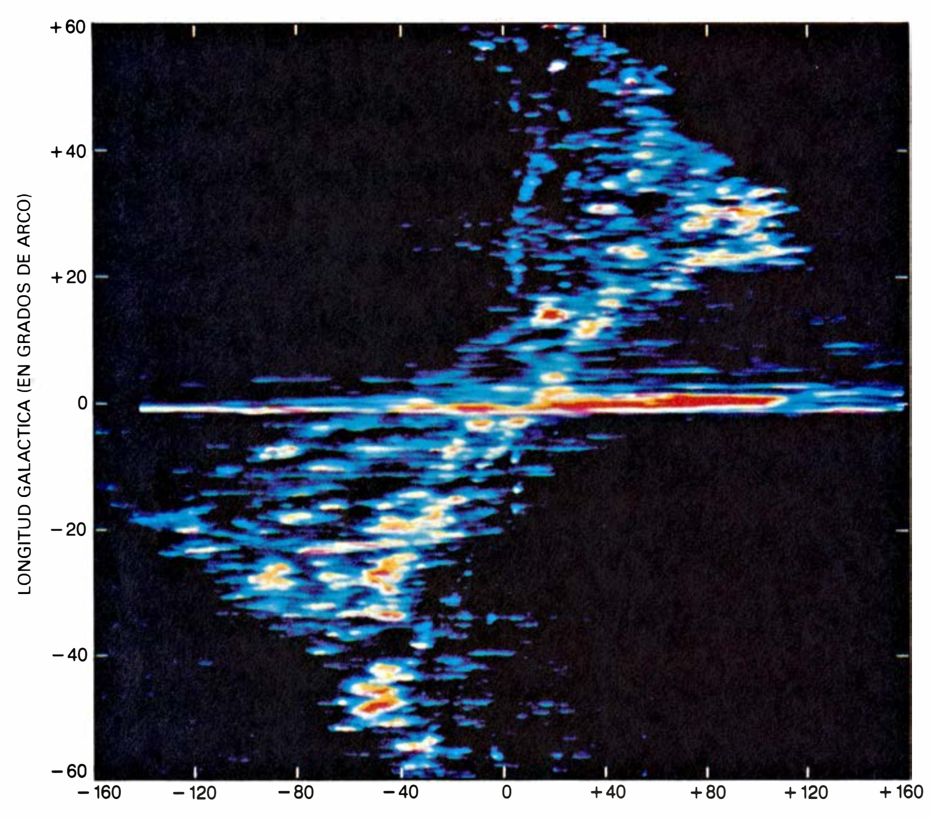
Abrir esta banda espectral a la obser-

vación astronómica ha requerido grandes esfuerzos técnicos en el Observatorio Nacional de Radioastronomía, en los Laboratorios Bell y en distintas universidades, donde se han construido receptores de radio de alta sensibilidad y telescopios con superficies reflectoras dotadas de la necesaria precisión. Si bien en un comienzo la tecnología para las longitudes de onda corta exigió un gran empeño, nos hemos encontrado con un beneficio colateral: hasta los telescopios sin pretensiones proporcionan excelentes resoluciones angulares. Un telescopio de 14 metros que observe la línea de 2,6 milímetros del monóxido de carbono tiene una resolución de 50 segundos de arco. Para obtener una resolución equivalente observando la línea típica de 21 centímetros del hidrógeno atómico se necesitaría un telescopio de casi 1500 metros de diámetro.

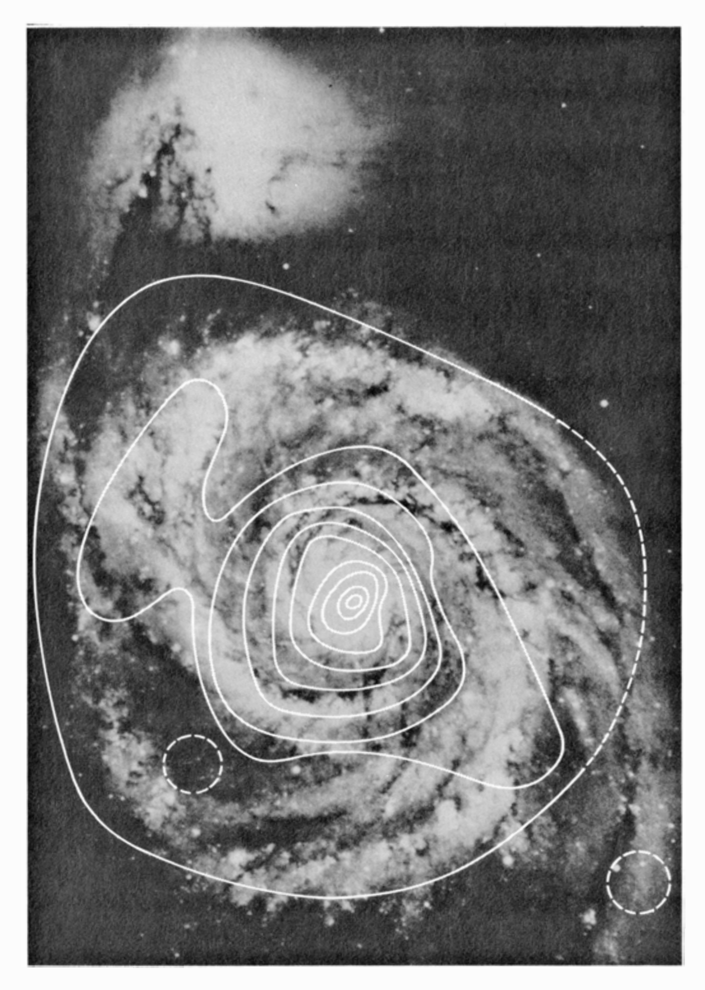
De la emisión del monóxido de carbono observada en una nube molecular puede deducirse, además de la temperatura y densidad de las moléculas, su movimiento. Los movimientos de los gases a lo largo de la visual se detectan midiendo el corrimiento Doppler de la frecuencia de la emisión en una partícula dada de gas con respecto a la frecuencia de la misma transición medida en los laboratorios terrestres. Densidad y temperatura se obtienen por medios indirectos. En ausencia de efectos externos, la molécula emitirá radiación y caerá hasta el estado de mínima energía de rotación, permaneciendo allí hasta que el medio circundante le suministre energía suficiente para volver a excitarla. Son los choques con el hidrógeno molecular los principales instigadores de esta excitación. Como la frecuencia de los choques depende de la densidad de moléculas, el brillo de la emisión molecular en una nube sirve para medir la densidad del hidrógeno molecular. En el caso del monóxido de carbono, las desintegraciones radiactivas son relativamente lentas, comparadas con los tiempos entre colisiones; ello permite que la distribución del CO entre los diversos estados de rotación ofrezca una distribución térmica característica en todas las nubes, salvo en las de más baja densidad. De aquí que, en las nubes más densas, el brillo de la emisión del CO proporcione una estimación de la temperatura del hidrógeno molecular. Para medir la densidad del gas en dichas regiones, debe recurrirse a otras moléculas, tales como el cianuro de hidrógeno (HCN) o el monosulfuro de carbono (CS), que tienen una desintegración radiactiva más rápida.

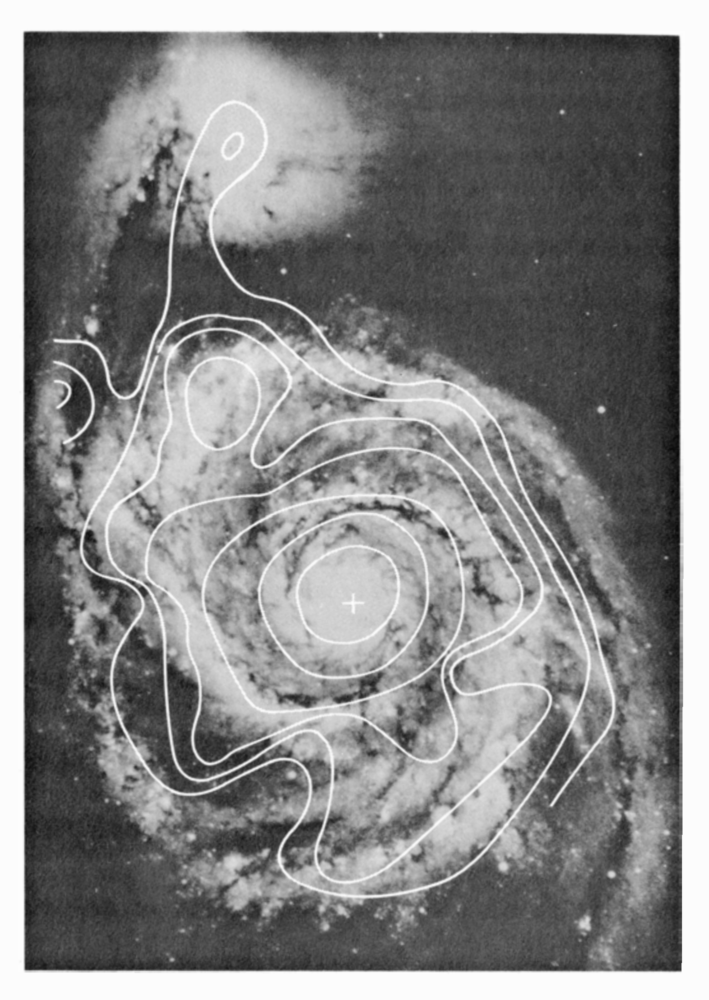
La extensión de la nube molecular de Orión puede estimarse, a partir de las emisiones del monóxido de carbono, en más de tres grados hacia el Sur y dos grados al Norte de la brillante región óptica H II. Esta medida angular corresponde a una distancia lineal de casi 100 años-luz en la dimensión más larga. Así, la extensión lineal de la nube molecular es unas 50 veces mayor que la de la brillante región óptica. La cantidad de gas molecular contenida en este espacio se estima ahora en unas 200.000 veces la masa solar, lo que representa mil veces más que la masa total de las estrellas visibles en el cúmulo del Trapecio.

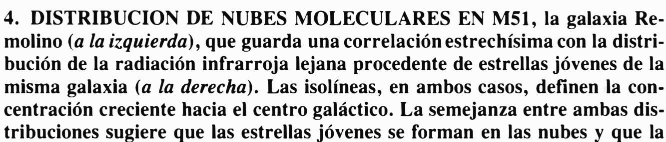
En la vecindad de la fuente infrarroja más brillante de la nebulosa, la situación no es, en absoluto, la que podría esperarse si se tratase del colapso gradual de una nube fría en el proceso de formación de estrellas. Los efectos de las fuentes infrarrojas inmersas pueden verse largamente hasta cinco años-luz de profundidad. Sus radiaciones calientan el polvo circundante, el cual, a su vez, calienta al hidrógeno molecular. Las observaciones de monóxido de carbono muestran un gradiente de temperatura que va desde 20 grados Kelvin, a un radio de cinco años-luz, hasta aproximadamente 100 grados, a un radio de 0,1 años-luz. En el interior de esta última distancia aparece un brusco cambio: el gas se mueve a velocidad supersónica (a velocidades de hasta un número de Mach igual a 100); una pequeña fracción del hidrógeno molecular se calienta hasta temperaturas superiores a 2000 grados. Aunque no se co-



3. NUBES MOLECULARES EN NUESTRA GALAXIA, exploradas mediante las radioondas de 2,6 milímetros emitidas por las moléculas de monóxido de carbono del disco interior de la misma. Las nubes gaseosas, representadas por los trazos coloreados, tienen diámetros estimados entre 50 y 200 años-luz. La primera exploración completa de la parte interior de la galaxia se compiló a partir de una serie de mediciones realizadas a lo largo del plano galáctico con el radiotelescopio de 14 metros de Massachusetts y con un radiotelescopio de cuatro metros que funciona en la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) de Australia. La escala vertical da la longitud galáctica en grados de arco; el cero corresponde a la dirección del centro de la galaxia. La escala horizontal mide la velocidad de las distintas nubes moleculares, a partir del corrimiento Doppler en la frecuencia de las radioondas emitidas con respecto a la frecuencia patrón para el monóxido de carbono medida en el laboratorio. Puesto que las velocidades observadas se pueden atribuir en gran parte al movimiento orbital de las nubes alrededor del centro galáctico, las medidas indican la posición de las nubes. Estas se concentran principalmente en dos lugares: a longitudes galácticas inferiores a cuatro grados (correspondientes a los 2000 años-luz centrales de la galaxia) y a longitudes, tanto positivas como negativas, entre 20 y 40 grados (correspondientes a un anillo de materia a medio camino entre el Sol y el centro galáctico). La exploración fue realizada por Daniel Clemens, David R. Sanders y uno de los autores de este artículo (Nick Scoville), de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Philip M. Solomon, de la Universidad del estado de Nueva York en Stony Brook, Richard N. Manchester, Brian Robinson y John Whiteoak, ambos del CSIRO, y William H. McCutcheon, de la Universidad de Columbia Británica. El procesado de la imagen en color se realizó en el Centro de Exploración Remota de la Universidad de Massachusetts.





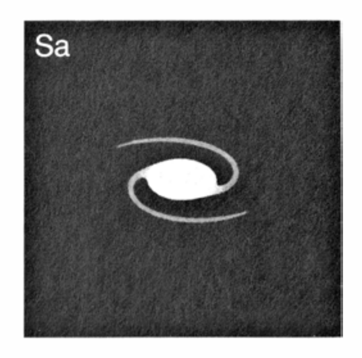

4. DISTRIBUCION DE NUBES MOLECULARES EN M51, la galaxia Remolino (*a la izquierda*), que guarda una correlación estrechísima con la distribución de la radiación infrarroja lejana procedente de estrellas jóvenes de la misma galaxia (*a la derecha*). Las isolíneas, en ambos casos, definen la concentración creciente hacia el centro galáctico. La semejanza entre ambas distribuciones sugiere que las estrellas jóvenes se forman en las nubes y que la velocidad de formación es proporcional a la cantidad de gas molecular en cada punto. El mapa de nubes moleculares se basa en mediciones de monóxido de carbono realizadas por los autores con el radiotelescopio de 14 metros de Massachusetts. El mapa del infrarrojo lejano fue realizado por James Smith y sus colegas, con la ayuda del observatorio volante NASA C-141. Nótese la falta de correlación apreciable con los brazos espirales de la galaxia.

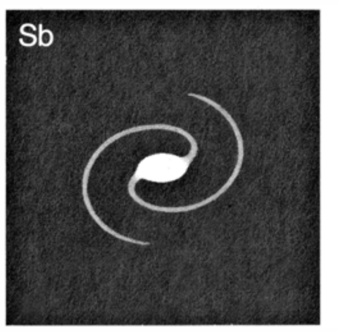
noce bien la causa de este fenómeno, se cree que los movimientos deben su origen a una estrella joven de gran energía que está fragmentando los últimos restos de su capullo natal. Las altas temperaturas se encontrarían en los frentes de choque, donde el gas supersónico, arrojado hacia el exterior por la estrella joven, choca con la nube circundante. Al remover y deformar ocasionalmente la mencionada nube, esas corrientes explicarían la velocidad, generalmente baja, de formación de estrellas en las nubes. Tal vez el nacimiento de estrellas de suficiente energía constituya un freno eficaz para la subsiguiente formación de estrellas en la misma región.

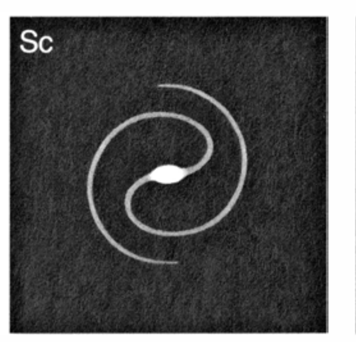
La nube de Orión es una más entre las muchas regiones de esas que pueblan nuestra galaxia. Para determinar la cantidad de gas molecular en el interior de la galaxia, uno de los autores (Scoville), en colaboración con Philip M. Solomon, de la Universidad del estado de Nueva York en Stony Brook, realizó en 1975 la primera exploración de la emisión del monóxido de carbono desde el disco galáctico usando el telescopio de 11 metros del Observatorio Nacional de Radioastronomía. Los resultados mostraron pocas semejanzas con imágenes anteriores de las nubes de hidrógeno atómico más tenues, designadas por regiones H I. Se descubrió que las nubes moleculares abundaban extraordinariamente entre los 500 a 1000 años-luz, a contar desde el núcleo galáctico; mas su número menguaba a distancias mayores. Por encima de todo, sorprendió descubrir que la densidad de gas molecular crecía nuevamente hasta un segundo máximo para un radio a medio camino entre el Sol y el centro galáctico. Este anillo de gas molecular, con un máximo hacia los 15.000 años-luz del centro de la galaxia, apareció también en exploraciones ulteriores y más completas de las emisiones de monóxido de carbono, realizadas por radioastrónomos en otros observatorios de los Estados Unidos.

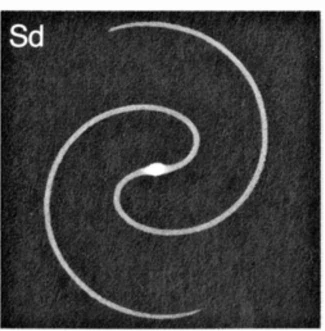
Puesto que todos los datos galácticos primitivos se habían recogido con radiotelescopios en el hemisferio Norte, quedaba la duda de hasta qué punto el plano galáctico meridional presentaba una estructura similar. El año pasado, un grupo de radioastrónomos dirigidos por Brian Robinson, de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) en Australia, terminó un estudio sobre la emisión del monóxido de carbono en el hemisferio Sur. Las cantidades de gas molecular que se ven en áreas equivalentes, al lado septentrional y al meridional de la galaxia, concuerdan dentro de un 20 por ciento. La ditribución meridional es semejante a la septentrional en mostrar un máximo en forma de anillo a medio camino entre el Sol y el centro galáctico; difiere algo, sin embargo, la morfología de la parte meridional del anillo: el máximo tiene una densidad un 30 por ciento menor y la anchura es, en consecuencia, mayor.

La masa total de gas molecular, estimada a partir de la emisión de monóxido de carbono en el interior de nuestra galaxia, está entre mil y tres mil millo-









5. VARIAN LAS GALAXIAS ESPIRALES desde las de tipo *Sa*, que tienen una apretada estructura de brazos y una gran protuberancia central, hasta las de tipo *Sd*, que presentan una estructura de brazos abierta y un núcleo pequeño. Nuestra galaxia posee una estructura intermedia, de tipo *Sbc*.

nes de veces la masa solar; ello equivale a un 15 por ciento de la masa estelar total de la misma región, aproximadamente. Esta cantidad de gas excede en mucho la masa de gas atómico interestelar de la región; de hecho, puede compararse con la cantidad de hidrógeno atómico en la galaxia entera hasta un radio doble del solar. Recuérdese que, diez años atrás, ese importante componente de nuestra galaxia nunca se había observado a escala galáctica. No sólo destaca por su abundancia, sino también porque son las nubes de hidrógeno molecular, y no las de hidrógeno atómico, las que forman el medio donde nacen las nuevas estrellas.

Poseen las nubes moleculares propiedades muy singulares. No sobresale Orión por un tamaño enorme; antes bien, se inscribe, dentro de la gama de las nubes moleculares gigantes de la galaxia, en el grupo de las menores. En 1981, David B. Sanders, a la sazón estudiante de segundo ciclo en Stony Brook, midió más de 300 nubes del anillo galáctico. Halló que la mayor parte del gas lo contenían nubes con un diámetro medio de unos 100 años-luz. No obstante su extrema ligereza (unas 300 moléculas de hidrógeno por centímetro cúbico), el volumen de las nubes es tal que su masa total equivale a entre 100.000 y varios millones de masas solares. Lo cierto es que se cree que las nubes moleculares gigantes constituyen los objetos de mayor masa de la galaxia. El número de nubes de diámetro superior a 50 años-luz se cifra quizás en unas 5000.

La relación entre las nubes moleculares gigantes y los restantes componentes de la galaxia –estrellas jóvenes de gran masa, gas más difuso y estrellas más antiguas– constituye una pieza importante para comprender la vasta máquina galáctica. ¿Se forman las nubes gigantes por colisión de múltiples nubes moleculares menores o por compresión de hidrógeno atómico difuso? ¿Hay siempre una nube molecular cerca de las estrellas jóvenes? Y si la hay, ¿están los lugares de nacimiento de esas estrellas en las profundidades de la nube o en la vecindad de su superficie? Las estrellas podrían formarse cerca de la superficie si el colapso de las nubes estuviera provocado por factores externos: el choque de una nube con otra.

La posición de estrellas jóvenes de gran masa tales como las del cúmulo del Trapecio se puede determinar, en toda la galaxia, por la radioemisión de baja frecuencia del gas ionizado que las rodea. Como cabía esperar, se da una excelente correlación entre las regiones H II y las nubes: casi todas las regiones H II ópticas conocidas o las regiones H II de radio de tamaño equivalente a la nebulosa de Orión tienen cerca una nube molecular. Las nubes mayores y más calientes tienden a estar asociadas con esas regiones H II. Puesto que los brazos espirales de las galaxias que trascienden la nuestra reciben su mejor delimitación por las regiones H II, la correlación parece sugerir que la mayor parte de las nubes gigantes residen en los brazos de nuestra galaxia. Ocurre, no obstante, que hay muchas más nubes moleculares gigantes en nuestra galaxia que regiones H II gigantes conocidas (5000 frente a 200); y muchas de las nubes más frías y menores están alejadas de cualquier región H II. Por tanto, hemos de proceder con tiento al interpretar las observaciones de monóxido de carbono obtenidas a baja sensibilidad con mala resolución angular. Tales datos nos inducirían a creerlos relativos a brazos espirales en virtud de la tendencia observacional hacia las nubes mayores y calientes; y ello, aun cuando las nubes de todos los tamaños y temperaturas estuvieran distribuidas con bastante uniformidad.

De acuerdo con un modelo reciente, propuesto por John Y. Kwan, de los Laboratorios Bell y de la Universidad de Massachusetts en Amherst, la existencia de nubes particularmente grandes en los brazos podría explicarse si otras menores de las regiones entre los brazos colisionaran y se soldaran, formando supernubes, o cúmulos de nubes, cuando llegan a los brazos. Si la frecuencia de colisión entre las nubes es más elevada en los brazos, ello justificaría la mayor velocidad de formación de estrellas de gran masa allí. Al chocar las nubes, es de esperar que a la compresión del gas en la superficie de contacto siga el colapso de fragmentos de las nubes para constituir una o varias protoestrellas. Tales regiones comprimidas favorecerían la formación de estrellas, porque la autogravitación del fragmento nuboso aumentaría en virtud de su mayor densidad.

Una vez constituidas las estrellas de gran masa, su alta luminosidad calienta la nube de polvo circundante. He ahí el porqué de la correlación de las nubes calientes con la posición de las regiones H II. Después de abandonar los brazos, las supernubes pueden disgregarse en unidades menores, tal vez como resultado de las fuerzas disruptivas de las cálidas regiones H II.

La observación de la extensa difusión del gas molecular en nuestra galaxia plantea ciertas preguntas básicas cuya resolución llegará sólo con el seguimiento de otras galaxias. ¿Es el anillo de nubes moleculares, a una distancia de aproximadamente 15.000 años-luz desde el centro galáctico, una característica común a otras galaxias? ¿Es una indicación de la forma que tenía en un comienzo nuestra galaxia, o simplemente ha evolucionado hasta esta forma en el curso de su envejecimiento? ¿Es la abundancia relativa de gas molecular que se observa en el interior de nuestra galaxia una característica general de la mayoría de las espirales? ¿Depende de su forma la cantidad y distribución de las moléculas que hay en una galaxia? Por último, ¿de qué manera depende, la luminosidad total de una galaxia dada, de la cantidad y

distribución de las nubes moleculares? Podría esperarse que existiera alguna relación entre ambas si las estrellas jóvenes que se forman en el interior de las nubes generasen una considerable porción de la energía de la galaxia.

Las investigaciones ópticas han permitido establecer que las propiedades estelares de las galaxias siguen caminos de evolución previsibles. Baade, pionero en el ámbito de las galaxias, observó que las estrellas podían agruparse en dos clases. A la primera, integrada por estrellas jóvenes y azuladas, la llamó Población I; a la segunda, cuyos miembros incluyen estrellas antiguas y rojizas, Población II.

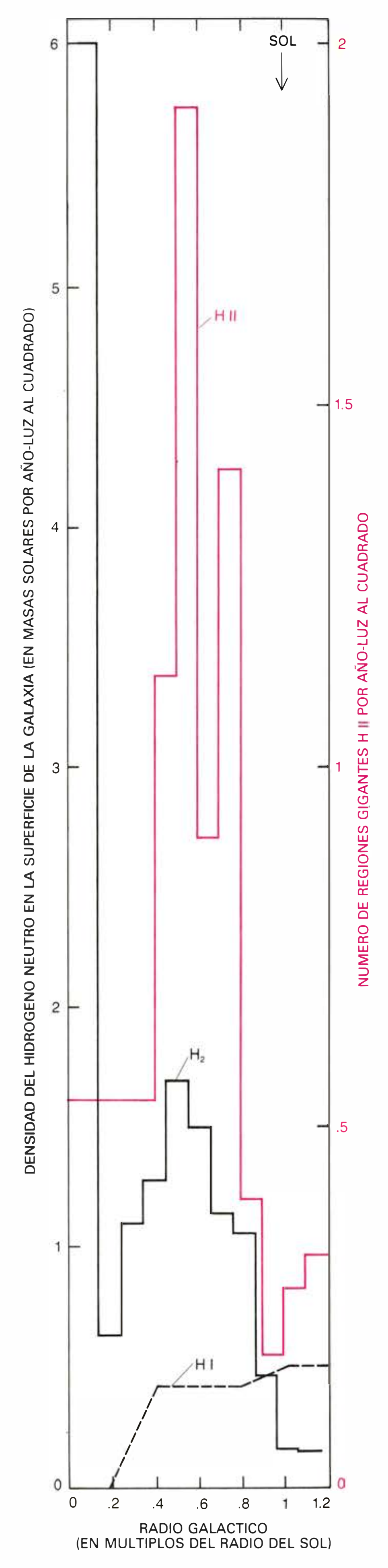
La inmensa mayoría de las estrellas de las galaxias elípticas y lenticulares poseen una edad superior a los cinco mil millones de años. Salvo en contados casos, hay muy pocas indicaciones de la existencia ni de estrellas jóvenes de la Población I, ni de gas interestelar suficiente para formar futuras generaciones de estrellas; en esas galaxias, la provisión de gas se agotó hace mucho tiempo o fue arrastrada hacia el espacio intergaláctico circundante. Dichas galaxias contienen principalmente estrellas de la Población II.

Las espirales, la nuestra entre ellas, albergan ambas poblaciones. Las estrellas antiguas, de la Población II, ocupan un volumen esferoidal que se parece a una galaxia elíptica, mientras que las jóvenes, de la Población I, se limitan, de una manera punto menos que exclusiva, al delgado disco, junto con casi toda la materia interestelar restante. Tanto la distribución esferoidal de antiguas estrellas como el disco más joven tienen un centro común. Entre las galaxias espirales, la proporción relativa de componentes antiguos y jóvenes puede variar mucho, desde las espirales de tipo primitivo (designadas *Sa*), que destacan por su gran protuberancia nuclear y brazos espirales estrechamente trenzados, hasta las espirales de tipo tardío (*Sd*), que tienen un núcleo visible casi insignificante y una configuración espiral muy abierta y desigual. Se cree que nuestra galaxia es de tipo *Sbc*, de características intermedias. Dentro de cada clase morfológica, hay una amplia diversidad en luminosidad y masa, en la que la emisión total de energía varía en múltiplos que se extienden desde 10 hasta 100.

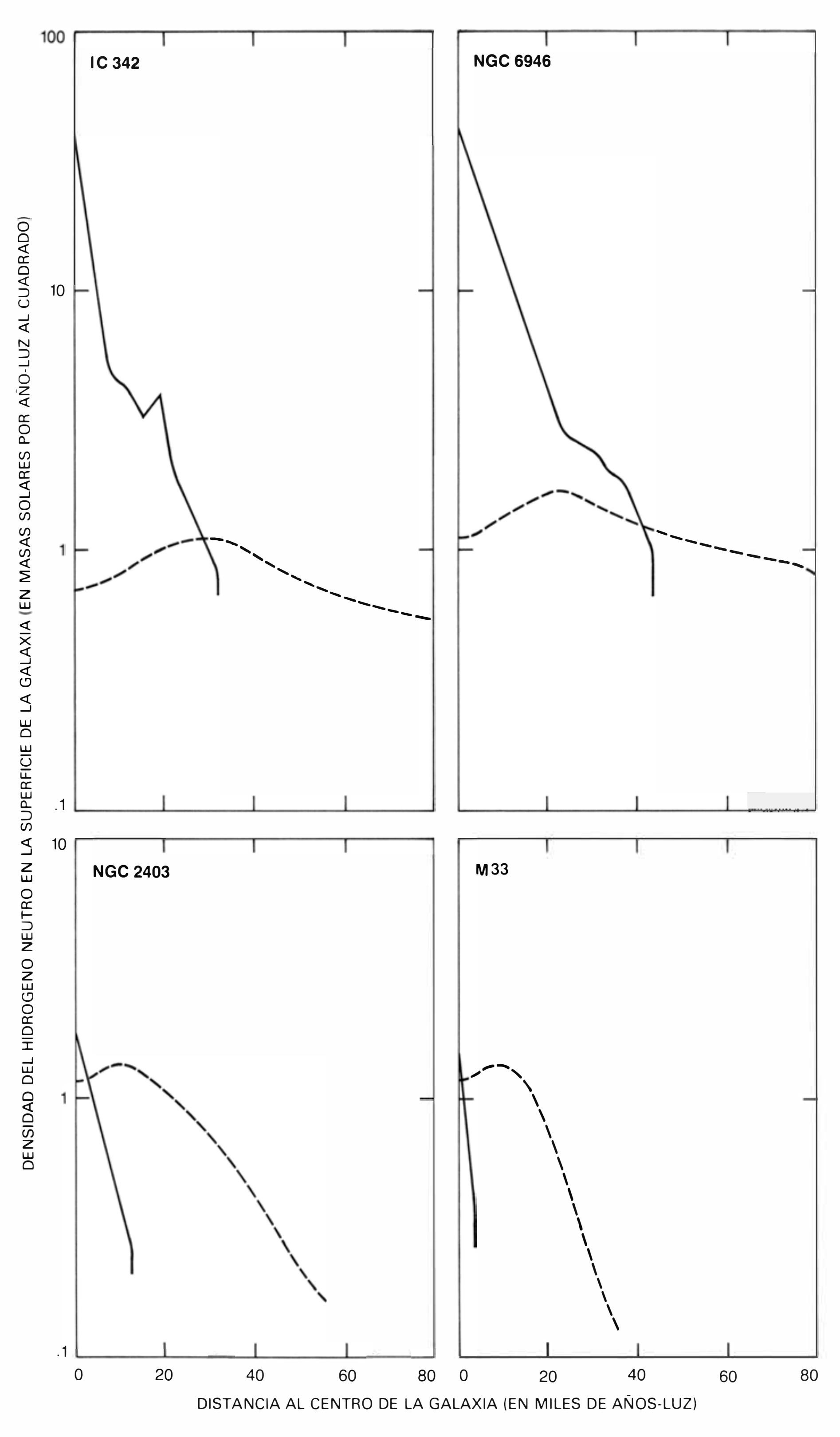
Los primeros estudios de la radiación emitida por moléculas de otras galaxias fueron realizados por Lee J. Rickard, de la Universidad Howard, y Patrick Palmer, de la de Chicago. Se dedicaron en un principio a investigar las galaxias que tenían emisión infrarroja anormalmente intensa. Se creía que, en ellas, se producían brotes de formación de estrellas alimentados por una gran abundancia de gas molecular. Nosotros hemos emprendido recientemente un amplio programa para cartografiar la emisión de monóxido de carbono en galaxias espirales más normales, con el fin de dilucidar qué relación existe entre el contenido y distribución del gas molecular y la morfología y luminosidad de la galaxia. Las observaciones se realizaron con el radiotelescopio de 14 metros del Observatorio de Radioastronomía Five College en Massachusetts; es el mayor de tales instrumentos en los Estados Unidos y proporciona una alta resolución angular, lo que permite observar pequeños detalles en las galaxias exteriores. De las 80 galaxias estudiadas hasta ahora, casi 40 han mostrado una emisión detectable de monóxido de carbono y 20 de ellas se han cartografiado en parte. La mayoría de estas galaxias se clasifican entre las espirales normales, aunque algunas sean irregulares.

Las grandes distancias a que se encuentran las galaxias exteriores impiden la observación en éstas de nubes moleculares aisladas. Sin embargo, la resolución del telescopio de 14 metros (50 segundos de arco) permite contemplar la emisión compuesta procedente de regiones de diámetros típicos de 5000 años-luz, que abarcan muchas nubes moleculares. Las observaciones de monóxido de carbono en las galaxias exteriores proporcionan, pues, una determinación de la distribución global de nubes moleculares, pero no de sus propiedades singulares.

Una de las galaxias espirales estudiadas con mayor detalle por varios grupos de radioastrónomos es M51, la galaxia Remolino, cuya emisión de monóxido de carbono se detecta en la totalidad del disco visible. Al igual que en muchas galaxias, la máxima concentración de gas molecular se encuentra cerca del



6. EXISTENCIA DE UN ANILLO en nuestra galaxia de material capaz de formar estrellas, reflejada en esta gráfica. La línea de color muestra la distribución de regiones gigantes de hidrógeno ionizado (H II), indicador fidedigno de dónde se están formando estrellas de gran masa en una galaxia. Las líneas negras señalan la distribución de hidrógeno molecular (H_2). Ambas distribuciones muestran un máximo acusado hacia la mitad de distancia del Sol al centro de nuestra galaxia. En contraste, la distribución de hidrógeno atómico neutro (H I) (no ionizado), simbolizada por la línea negra de trazos, permanece sensiblemente constante, subiendo un poco más allá de la órbita del Sol, donde escasean las regiones gigantes H II.



7. COMPOSICION DE LA MATERIA INTERESTELAR en cuatro galaxias de un tipo similar, estrechamente ligada al brillo de las mismas. Las cuatro galaxias representadas aquí se clasifican dentro del tipo *Scd*: espirales abiertas con un núcleo comparativamente pequeño. Cerca de los centros de las dos galaxias de alta luminosidad, IC 342 (*parte superior izquierda*) y NGC 6946 (*superior derecha*), el cociente de hidrógeno molecular, H_2 (*curva negra*), a hidrógeno atómico neutro, H I (*curva negra de trazos*), es aproximadamente de 100 a 1, mientras que en las de baja luminosidad, NGC 2403 (*parte inferior izquierda*) y M33 (*parte inferior derecha*), las cantidades de hidrógenos atómico y molecular son aproximadamente las mismas. Las cuatro galaxias tienen máximos semejantes de hidrógeno neutro en su superficie; lo que varía de galaxia a galaxia es, pues, la cantidad de gas molecular. Dicho de otra manera, las galaxias de alta luminosidad contienen mucho más gas molecular que las poco luminosas. Las galaxias de poca luminosidad son, también, menores, como lo indica la limitada extensión de su componente de hidrógeno atómico. Las observaciones de hidrógeno molecular fueron realizadas por los autores; las de hidrógeno atómico se deben a David H. Rogstad y G. Seth Shostak, del Instituto de Tecnología de California.

centro. Pero sorprende el decrecimiento de concentración sistemático y bastante suave que se advierte desde el centro hacia fuera, hasta donde la emisión se hace imposible de detectar. En otras palabras, no hay indicios de concentración de gas molecular ni en forma de anillo ni de brazos. La ausencia de tales concentraciones cabe atribuirla, en parte, a una resolución insuficiente: los brazos, muy delgados, dejan, además, poco espacio entre ellos. Sí tiene importancia la ausencia de anillo; de existir allí un accidente de esta clase, similar al de nuestra galaxia, se observaría fácilmente.

Un dato de interés para comprender cómo varía la velocidad de formación de estrellas en el seno de los discos nos lo ofrece la comparación de la distribución molecular en M51 con la distribución de luminosidad, en particular la luminosidad de las estrellas más jóvenes. Con la ayuda de un telescopio a bordo del Observatorio Volante C-141 de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), James Smith, del Observatorio Yerkes, acaba de confeccionar un mapa completo de M51 en la parte del espectro infrarrojo lejano, a longitudes de onda entre 80 y 200 micrometros. Esta radiación se produce, parcialmente, por fuentes similares a las brillantes fuentes infrarrojas situadas detrás de la nebulosa de Orión, que son, presumiblemente, cúmulos de estrellas jóvenes, formadas en los últimos 10 millones de años y envueltas en polvo todavía. La luminosidad total medida por Smith en la banda del infrarrojo lejano es de 30.000 millones de veces la solar dentro de la región del disco óptico hasta un radio galáctico similar al del Sol en nuestra propia galaxia.

Reviste una importancia fundamental el descubrimiento de que existe una proporcionalidad, de uno a uno casi, entre la luminosidad en el infrarrojo lejano y la emisión del monóxido de carbono en diferentes puntos de M51. Ambas decrecen suavemente con la distancia al centro de la galaxia; la dependencia con el radio resulta casi idéntica. Si la velocidad de formación de estrellas viene indicada por la energía emitida en la banda del infrarrojo y la provisión de gas capaz de formar estrellas viene indicada por la emisión del monóxido de carbono, se puede entonces concluir que la velocidad de formación de estrellas está determinada únicamente por la abundancia de las nubes moleculares, no por su posición en la galaxia.

A primera vista, esta conclusión parece sorprendente: cabría esperar que las fuerzas externas que provocan el colapso de la nube para formar estrellas dependiesen estrechamente de la distancia al centro de la galaxia. Tal vez una explicación natural de la sencilla correlación entre la velocidad de formación de estrellas y la masa de la materia molecular se halle en la naturaleza de las nubes. Si las nubes de M51 son primordialmente nubes gigantes como las de nuestra galaxia, se hace difícil imaginar que determinados fenómenos exteriores, piénsese en las capas en expansión de una supernova o las regiones H II, penetren muy adentro en el interior de las nubes. La inercia de una nube con una masa de un millón de veces la solar es, sencillamente, demasiado grande para que una porción importante de la nube quede afectada. En cierto sentido, las nubes están ya preñadas de formación de estrellas; un estímulo exterior que penetre sólo en sus capas superficiales puede hacer poco por alterar la velocidad total de formación de estrellas en la nube entera.

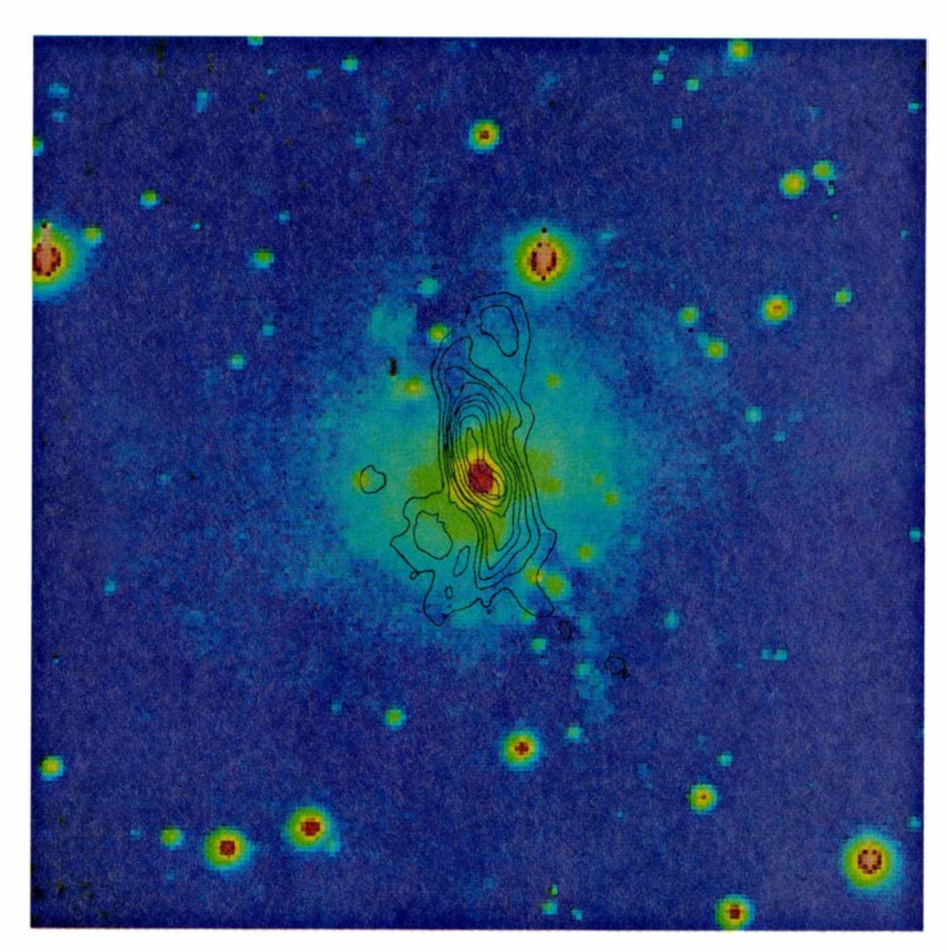
La proporcionalidad entre la velocidad de formación de estrellas y la abundancia de gas molecular encontrada en M51 parece, ahora, ser regla general en galaxias espirales de tipo tardío y de alta luminosidad, cuya cantidad de gas molecular excede a la de gas atómico. De la mayoría de las galaxias carecemos de datos completos en el infrarrojo lejano, pero puede obtenerse una medida aproximada de la velocidad de formación de estrellas a partir de la luz azul en el disco galáctico. Luz que generan principalmente las estrellas de alta temperatura y edad inferior a algunos miles de millones de años. Así, en las espirales del tipo tardío IC 342 y NGC 6946 (ambas clasificadas como *Scd*), hemos hallado variaciones con el radio similares para la emisión del monóxido de carbono y para la luz azul.

Habida cuenta de que la emisión del monóxido de carbono indica la distribución del componente más denso del medio interestelar, vale la pena compararla con la emisión del hidrógeno atómico; ésta indica, presumiblemente, el gas menos denso, si bien todavía neutro. Muchos astrónomos han realizado en los últimos 10 o 20 años estudios detallados del contenido de hidrógeno atómico y su distribución en las galaxias exteriores. A pesar del dominio de luminosidades de las galaxias *Scd*, todas presentan distribuciones semejantes de hidrógeno atómico, a saber, una densidad casi constante en el disco, salvo en el centro, donde hay defecto de H I.

En general, el tamaño de la envoltura de hidrógeno atómico de cada galaxia es también mucho mayor que el tamaño visible de la galaxia. El contenido de monóxido de carbono y su distribución difieren notablemente de una galaxia a otra; presentan poco parecido con los perfiles del hidrógeno atómico. En concreto, se encontró que las galaxias con alta luminosidad tenían abundancia de nubes moleculares, mientras que las de baja luminosidad mostraban sólo pequeñas cantidades de gas molecular. Las distribuciones moleculares evidencian también intensos gradientes en la dirección radial. Así, las de alta luminosidad tienen principalmente gas molecular en el centro y gas atómico en las regiones exteriores, mientras que las galaxias de baja luminosidad poseen, sobre todo, gas atómico por doquier. En este aspecto, la nuestra se aproxima más a las galaxias exteriores de alta luminosidad.

La esperanza está puesta, obviamente, en que, observando otras galaxias, podamos llegar a desentrañar los pormenores de la nuestra. Por constituir ésta un término medio en la secuencia de tipo de galaxias espirales, llamó en un comienzo la atención que ninguna de las galaxias en que primero se exploró el monóxido de carbono presentaran un máximo central y un anillo de nubes moleculares, que sí ofrecía la nuestra. Está ahora claro que este descubrimiento era, al menos en parte, atribuible a la selección observacional: la mayoría de las galaxias en que se observó al principio el monóxido de carbono eran polvorientas espirales *Sc*, no tipos intermedios como la nuestra. A medida que se observan más galaxias *Sa* y *Sb*, el anillo se ve con más frecuencia. El origen de esta estructura podría estar relacionado con el tamaño de la protuberancia central nuclear, formada por estrellas antiguas.

Si comparamos las distribuciones moleculares observadas en todas las galaxias espirales, los discos exteriores muestran un decrecimiento similar, bastante suave, de la concentración; las discrepancias aparecen en el disco interior. Hay galaxias que revelan una caída de la densidad de hidrógeno molecular en el centro; en otras, la densidad del gas continúa su crecimiento desde el disco exterior hasta el mismo núcleo. De donde se infiere que el rasgo a destacar no es tanto el máximo del anillo cuanto el vacío que algunas veces aparece en la zona interior. Podría materializarse un posible eslabón entre el tamaño de la población de es-



8. NUBES MOLECULARES DEL NUCLEO de la galaxia espiral IC 342; están confinadas en una región en forma de barra que mide unos 6000 años-luz de longitud (*isolíneas negras*). Los datos sugieren que las nubes penetran hacia el centro de la galaxia, a lo largo de la barra, lo que posiblemente explica la alta velocidad de formación de estrellas que allí se da. Kwok-Yung Lo y sus colaboradores, en Cal Tech, delinearon las nubes moleculares en razón de su radioemisión de longitud de onda 2,6 milímetros procedente de las moléculas de monóxido de carbono, usando el nuevo interferómetro de onda milimétrica de alta resolución del Radioobservatorio de Owens Valley. La imagen en falso color se obtuvo con un dispositivo de acoplamiento de carga conectado al telescopio de 1,5 metros del Observatorio Monte Wilson.

trellas de la protuberancia central y la existencia de un hueco en la distribución de gas, si el gas que había originariamente en esta zona se hubiera agotado en época temprana para formar las estrellas de la masiva protuberancia central. Por qué algunas galaxias desarrollan un volumen central de masa mucho mayor que el de las demás es un misterio de la constitución inicial de las galaxias.

La correlación general de la distribución del monóxido de carbono con la luminosidad óptica, descubierta por los autores primero en ciertas galaxias espirales de tipo tardío, vale también para la comparación de una muestra de galaxias en un amplio margen de luminosidades, pertenecientes todas a una clase morfológica dada. Para las regiones centrales de las galaxias de tipo *Sc* se obtienen unos resultados peculiares: la luminosidad óptica varía en proporción directa a la cantidad de gas molecular. Dicho de otra manera, cuantas más nubes moleculares haya, más estrellas se formarán; la galaxia tendrá, en consecuencia, una luminosidad más alta. Esta correlación coincide con la observada en distintas galaxias del tipo *Sc*, así la M51, donde la distribución de emisiones de monóxido de carbono reproduce la pauta de las estrellas jóvenes. El que se dé esa correlación en el seno de galaxias particulares del tipo *Sc* y entre galaxias confirma que se trata de una característica general de la formación de estrellas en galaxias de este tipo. Si hubiésemos de comparar el contenido central de hidrógeno atómico con las luminosidades ópticas dentro de la misma muestra de galaxias, no hallaríamos correlación alguna.

Tal vez las galaxias más enigmáticas sean aquel 10 por ciento cuyas regiones centrales muestran actividad energética en forma de emisiones de rayos X y radioondas, movimientos del gas alejados de la circularidad y potentes emisiones óptica e infrarroja. En una tasa de actividad muy baja, el centro de nuestra galaxia manifiesta la mayoría de esos síntomas. Para los casos más extremos, los quasars por ejemplo, se cree que la actividad la desencadena un objeto extraordinario, verbigracia, un agujero negro de gran masa, situado en el centro de la galaxia. Para otros casos, se ha sugerido que la actividad debe atribuirse a un brote de formación de estrellas. En esta última situación, las estrellas jóvenes de gran masa (hasta 1000 millones de masas solares en los ejemplos más extremos) presentarán una luminosidad intensa durante un período breve, unos 10 millones de años; un brote de formación de estrellas explicaría, pues, una elevada emisión instantánea de energía. Además, las explosiones de supernova que se producen al final del brote generarían movimientos de alta velocidad del gas, amén de intensas emisiones de radioondas y de rayos X. La duración del brote está limitada, obviamente, por la provisión de materia interestelar en la proximidad del centro de la galaxia, ya que la mayor parte del gas se condensará con el tiempo para crear estrellas y decrecerá la posterior velocidad de formación de éstas.

Un ejemplo próximo de esos fenómenos lo tenemos en la irregular galaxia M82. Se creyó, durante muchos años, que el núcleo de la misma había explotado, ya que se detectaban penachos de gas ionizado de alta velocidad por encima y por debajo del disco galáctico. Los filamentos apuntan radialmente hacia fuera, desde el centro de la galaxia, exactamente igual que si fueran corrientes gaseosas salientes. De acuerdo con la opinión hoy en vigor, muchas de las peculiaridades observadas en el núcleo de M82 no hay que atribuirlas a gas que saliera de la galaxia, sino a gas intergaláctico que cae sobre ella. El puente de hidrógeno que se extiende a través del cielo hasta la cercana galaxia espiral M81 sugiere que el gas descendente pudo haberse aspirado del halo exterior de M81 en el curso de una aproximación cercana entre ambas galaxias.

M82 constituye una de las fuentes infrarrojas más intensas fuera de nuestra galaxia. En su centro, la luminosidad infrarroja multiplica 20.000 millones de veces la luminosidad del Sol. Por culpa de las grandes cantidades de polvo absorbente que se ven en el plano de la galaxia, la luminosidad óptica en la misma región es una vigésima parte de la anterior. No debe sorprendernos que M82 resulte una de las fuentes de emisión por monóxido de carbono más intensas fuera de nuestra galaxia. Fue, de hecho, la primera galaxia detectada por Rickard y sus colegas a partir de su emisión de monóxido de carbono. Un

análisis de los movimientos del gas molecular, basado en el efecto Doppler que aparece en la emisión, revela una configuración ordenada, con el gas que se aleja hacia el Norte y el que se aproxima hacia el Sur. Contrariamente a lo que ocurre en las galaxias espirales normales, en las que el eje de rotación es perpendicular al disco galáctico, aquí el eje se encuentra inclinado casi 45 grados con respecto al disco. Este descubrimiento sugiere la presencia de movimientos en gran escala dirigidos radialmente, acercándose o alejándose del centro de M82; dicho de otra manera, las nubes gaseosas tienen velocidades apreciablemente diferentes de las de las órbitas circulares normales. Estos peculiares movimientos son, quizá, la consecuencia de entrada de gas desde el exterior de la galaxia.

Estudios ulteriores de la emisión de monóxido de carbono de M82 sugieren que la mayor concentración de moléculas se da en el centro de la galaxia, cerca del máximo de emisión en el infrarrojo lejano. La densidad del gas molecular excede la que posee el hidrógeno atómico en todo el disco óptico y mucho más allá, alcanzando los filamentos verticales. De hecho, la masa total de gas molecular que encierra la galaxia es casi la mitad de la masa total de las estrellas, es decir, aproximadamente tres veces la fracción observada en las galaxias espirales normales. En muchos aspectos, las peculiaridades observadas en M82 muestran un gran parecido con lo que se podría esperar de una galaxia joven: una población estelar con una alta proporción de estrellas de gran masa y corta vida, abundancia de gas interestelar que todavía no se ha condensado en estrellas y entrada continua de gas intergaláctico procedente de la parte exterior de la nube protogaláctica. ¿Podríamos aquí estar presenciando el nacimiento –o, más probablemente, el rejuvenecimiento– de una galaxia entera?

En algunas galaxias, las dotadas en particular de una moderada velocidad de formación de estrellas en la región central, la actividad podría iniciarse allí y mantenerse por entrada de gas procedente del disco exterior de la galaxia. Un buen ejemplo del fenómeno lo tenemos en la galaxia IC 342. Kwok-Yung Lo y sus colegas, del Cal Tech, han cartografiado recientemente la emisión de monóxido de carbono en el núcleo de esta galaxia, con el nuevo interferómetro de onda milimétrica de alta resolución del Radioobservatorio de Owens Valley. Sus datos muestran claramente, por primera vez, que las nubes moleculares están, en IC 342, confinadas en una estructura en forma de barra de unos 6000 años-luz de longitud. Las velocidades medidas de las nubes revelan una importante entrada de gas hacia el centro de la galaxia, donde anteriores observaciones infrarojas habían indicado una velocidad de formación de estrellas superior a la normal. La barra actuaría canalizando las nubes de gas hacia la zona central.

Mayor incluso resulta ser la tasa de actividad de la galaxia espiral NGC 1068. Pertenece a una clase de galaxias que se distinguen por un núcleo óptico extraordinariamente brillante y compacto, con intensas líneas de emisión procedentes de gas ionizado a altas velocidades. La luminosidad infrarroja lejana es asombrosa: 200.000 millones de veces la luminosidad solar, que mana toda ella de los 5000 años-luz centrales. La galaxia manifiesta también una extraordinaria riqueza en gas molecular, a juzgar por la intensa emisión de monóxido de carbono. Sin embargo, resulta inmediato que su presente nivel de actividad no puede mantenerse más allá de unos cientos de millones de años si la luminosidad la producen estrellas jóvenes y la provisión de materia para formar estrellas se limita a la que ahora puede verse en las regiones centrales. Se hace difícil entender cómo puede reponerse la provisión en la región central por transporte desde el disco exterior, donde el gas está describiendo en la actualidad una órbita circular. Ello aclara por qué se ha invocado los brotes de formación de estrellas para explicar estas galaxias; la actividad en la región central resulta probablemente esporádica.

De las cuestiones relativas al modelo de brotes de estrellas, quizá no sea la menos intrigante la que pregunta por el factor que regula el proceso. ¿Cómo comienza el brote, por qué se extiende y cómo se extingue su fuego? Puede ser que la actividad de las nubes moleculares distribuidas en todo el disco galáctico interno venga desencadenada por la actividad en el objeto central: un agujero negro, si es que existe uno allí. La NGC 1068 parece mostrar ambas clases de actividad. Hay una fuente de menos de 100 años-luz de diámetro que tiene luminosidad infrarroja, óptica y de rayos X de casi 100.000 millones de veces la solar. Presumiblemente, esta energía se origina en un objeto central compacto. Al mismo tiempo, disponemos de claros indicios de que la luminosidad en el infrarrojo lejano, de magnitud similar, se origina en un disco de nubes que se extiende a varios miles de años-luz, al menos. Tal vez la fuente

9. M82, GALAXIA MUY PECULIAR, observada en dos longitudes de onda diferentes. La fotografía en blanco y negro (*arriba*) fue tomada con luz roja con el telescopio de 5 metros en Monte Palomar. Muestra un disco amorfo con oscuras bandas de polvo destacadas sobre su superficie y un enrollado conjunto de filamentos que se extienden hacia fuera, formando ángulo recto desde el centro del disco. La imagen inferior, basada en la emisión de 2,6 milímetros de las moléculas de monóxido de carbono de la misma región, fue realizada por los autores. El brillo de la imagen es proporcional a la intensidad de emisión. Los colores representan la velocidad del gas respecto al centro de la galaxia; el rojo corresponde a gas que se aleja del observador y, el azul, a gas que se acerca. Los datos indican que el gas del disco gira en un plano situado según la visual y que el gas de los filamentos cae hacia el centro galáctico.

central insta la formación de estrellas en las nubes situadas más allá lanzando ondas de choque explosivas a través de la galaxia. Podría ocurrir también que la región fuese inerte hasta la acumulación de una masa crítica de materia formadora de estrellas; entonces, un pequeño estímulo inicial de formación de estrellas podría tornarse autosuficiente y conducir, además, a una reacción de formación de estrellas en cadena e incontrolada. Hoy, las observaciones moleculares cubren un número demasiado pequeño de galaxias para que pueda saberse si las hay con gran abundancia de gas pero poca formación activa de estrellas, como sugeriría la segunda posibilidad. Segunda posibilidad que deja pendiente la pregunta acerca de la naturaleza del objeto central.

Sabemos con certeza que la mayoría de las estrellas se forman en nubes moleculares. Esta conclusión se sigue de estudios de regiones próximas de formación de estrellas, tales como la nebulosa de Orión; también se infiere de la alta correlación que se encuentra en las galaxias exteriores entre el gas molecular y la radiación procedente de estrellas jóvenes. El otro componente gaseoso importante de esas galaxias, el hidrógeno atómico, no muestra semejante correlación.

Pese a los conocimientos adquiridos en los últimos años, los astrónomos han de despejar todavía incógnitas relativas a la naturaleza de los brazos espirales de las galaxias. ¿Qué fenómeno rige la morfología visible de las galaxias? ¿Es el brazo un mero cambio de fase del disco galáctico, como las nubecillas en forma de borlas blancas de la atmósfera terrestre? ¿Tiene acaso el brazo una estructura más sustancial, quizás una onda de densidad de materia que se propaga a través del disco galáctico? Las respuestas dadas han sido esquivas, debido, en parte, a que la naturaleza de los brazos en una galaxia, o incluso en una región de una galaxia, puede diferir de la que tiene en otra.

Los estudios de observación de gas molecular han mostrado sin ambages que la abundancia de nubes moleculares varía considerablemente de una galaxia a otra, e incluso a diferentes radios dentro de una misma galaxia. Si la existencia de nubes moleculares es un prerrequisito para la formación de estrellas, en las galaxias con grandes cantidades de gas molecular esa condición se cumplirá en todo el disco. En tales casos, hay que esperar que las pautas de formación de estrellas sean mucho menos ordenadas y coherentes, ya que la formación de estrellas estará muy extendida. Por otra parte, en las galaxias con baja reserva de gas la condición puede cumplirse en algunos lugares sólo. En estas últimas galaxias, resulta mucho más fácil que se desarrolle una gran configuración espiral de formación de estrellas, con nubes moleculares dispuestas sólo a lo largo de los brazos. Al analizar las configuraciones en gran escala de formación de estrellas, deben considerarse por separado las galaxias que encierran abundancia de gas molecular, la nuestra entre ellas, y las que poseen escasa cantidad, como M31 (galaxia de Andrómeda) o M81. Estas dos galaxias se citan frecuentemente como ejemplos de la clase de configuración espiral en gran escala que concuerda con la teoría de la onda de densidad; ambas destacan también por su extremada deficiencia en gas molecular. La escasa abundancia de gas molecular corrobora el descubrimiento de Richard A. Linke y Anthony Stark, de los Laboratorios Bell: la emisión de monóxido de carbono en M31 está estrechamente confinada a los brazos espirales visibles.

Para comprender la estructura espiral no importa tanto conocer cómo se forma un brazo espiral, cuanto averiguar por qué se mantiene la estructura durante un largo período de tiempo y se convierte en simétrica con respecto al centro de la galaxia. Sabido es que cualquier perturbación que se mueva radialmente en el disco de una galaxia espiral se verá obligada a describir una espiral, por el simple motivo de la rotación de la galaxia. En general, se ve que la velocidad de rotación de una galaxia es bastante constante con el radio en la mayor parte del disco, lo que significa que la materia que describe órbitas a mayor distancia se retrasará y la que lo hace a pequeña distancia se adelantará (con respecto a un punto en rotación que se halle a medio camino entre ellos). Así, en estas galaxias, efectos tales como una explosión o una erupción de formación de estrellas que se extiendan de una nube a otra crearán, naturalmente, un brazo curvado. El problema llega cuando se ha de coordinar el fenómeno en todo el disco.

Por lo que se ve, parte importante de la confusión sobre este asunto obedece a haber querido imponer la coherencia y simetría de una configuración espiral a todas las galaxias, cuando lo que procedía era reconocer que algunas galaxias, si no la mayoría, muestran pocas muestras de coherencia. Aceptado este punto de vista, las galaxias con una configuración espiral coherente serían las que tienen una abundancia comparativamente baja de nubes capaces de formar estrellas, así M31 y M81, o aquellas otras que poseen una galaxia compañera lo bastante cercana para ejercer una intensa marea atractiva sobre todo el disco galáctico, así M51. En las galaxias restantes, con abundancia de nubes, la formación de estrellas se produciría de manera más dispersa y menos organizada.

Hay un dato indiscutible: los brazos, sean como sean, constituyen los lugares donde se producen las estrellas de gran masa. No se sabe si hay en los brazos una intensificación en la tasa de formación de todo tipo de estrellas, o si hay sólo una variación en la proporción relativa de estrellas de gran masa. Cabe confiar que en la década que viene tengamos respuesta a tan crucial pregunta, ya que los telescopios infrarrojos a bordo de satélites apuntados hacia las galaxias externas gozarán de la resolución angular suficiente para separar los brazos de las regiones.

Nuestro conocimiento de la relación que media entre las regiones, frías y densas, que constituyen las nubes moleculares y las propiedades globales de las galaxias, recordemos su morfología y luminosidad, ha avanzado merced a las observaciones de la distribución en gran escala de dichas nubes moleculares, en nuestra galaxia y en otras. Por ser las nubes precursores de la formación de estrellas, es posible ahora obtener un gran caudal de información acerca de una fase crucial del ciclo vital de las estrellas y comenzar a entender la evolución de las galaxias.

Se ha supuesto que la mayor parte de la materia orgánica del universo (es decir, compuestos de carbono más complicados que el monóxido) debe acomodarse en la superficie y en la atmósfera de los cuerpos planetarios. La enorme masa de las nubes moleculares implica, sin embargo, que sean el principal depósito de materia orgánica. Además, si el sistema solar atravesara una de esas nubes, la absorción de luz sería tal que la totalidad de las estrellas, salvo las más cercanas, desaparecerían de nuestra vista. Si el Sol viajase con una velocidad estelar típica de 30.000 kilómetros por hora, transcurrirían más de dos millones de años antes de que la Tierra emergiese de la penumbra. Dada la abundancia de esas nubes en nuestra galaxia, tal suceso debe acontecer, aproximadamente, una vez cada mil millones de años, es decir, unas cinco veces en la historia de la Tierra. Si el hombre hubiera aparecido en uno de tales episodios, su visión del universo y su perspectiva filosófica habrían sido radicalmente distintos.

Celdilla de yunques de diamante para producir altas presiones

Este ingenioso dispositivo permite simular la presión existente cerca del núcleo de la Tierra mediante el simple giro de un perno de apriete manual. Su vasta aplicación ha revolucionado el estudio de las distintas fases de la materia

A. Jayaraman

En el vestíbulo de mi laboratorio, en la empresa AT & T Bell, hay un gran dispositivo hidráulico de algo más de dos metros de altura y varias toneladas de peso, sostenido por cuatro robustas columnas de acero. Una sustancia sólida colocada entre sus mordazas puede comprimirse hasta presiones 100.000 veces superiores a la del nivel del mar, o centuplicar, de largo, la presión existente en el fondo de la sima oceánica más profunda. A estas presiones, las fuerzas ejercidas sobre la materia sólida son tales que la red atómica que constituye el sólido puede deformarse y los electrones que lo recorren libremente alcanzar estados de energía poco usuales. Estos cambios finísimos alteran profundamente las propiedades microscópicas de una sustancia: densidad, color, opacidad, ductilidad, conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética. Por otro lado, la investigación de tales cambios en el laboratorio no es, de ningún modo, un mero ejercicio de física. Gran parte de la materia del universo, incluida una buena porción de la que forma la Tierra, está confinada a presiones muy por encima de las 100.000 atmósferas. Podría parecer que se necesitaría una prensa bastante mayor que la existente en mi vestíbulo para alcanzar las presiones usuales en las zonas más profundas del planeta.

Permítanme que les muestre el resto de mi laboratorio. Aunque me ocupo, casi por entero, de las propiedades de la materia sometida a altas presiones, la mayor parte de la estancia la llenan instrumentos que desempeñan un papel de apoyo en la investigación: el láser, el microscopio, el espectroscopio y el equipo automático que puede registrar los datos espectroscópicos. Sería fácil pasar por alto un dispositivo, reciente, que hace posible el resto del trabajo: puede sostenerse en la palma de la mano. A pesar de su tamaño, el aparato crea presiones de diez a quince veces mayores que la máxima que pueda alcanzarse con una prensa hidráulica. La máxima presión registrada hasta la fecha con el dispositivo se cifra en 1,7 millones de atmósferas, que es el equivalente de la presión a 2900 kilómetros planeta adentro.

En el centro del nuevo dispositivo hay dos diamantes sin mácula y tallados en forma de brillante; cada uno pesa de un tercio a un medio de quilate. Las puntas de los diamantes terminan en pequeñas superficies planas y se colocan, opuestas, una con respecto a otra. Los dos diamantes están montados en el interior de un mecanismo de acero endurecido, mecanizado con exigentes tolerancias y que produce un empuje a lo largo de un eje perpendicular a las caras del diamante. Aunque en la práctica hay cinco diseños, por lo menos, para el mecanismo de empuje, en el terreno de los principios apenas si se aleja de un simple cascanueces perfeccionado. Entre las caras de los diamantes se coloca una diminuta muestra del material a estudiar sometido a altas presiones; una fuerza que puede aplicarse a mano se multiplica de 500 a 1000 veces por medio del mecanismo, transmitiéndose a la muestra encerrada entre los diamantes. Por ser muy pequeña la zona donde se concentra la fuerza, la presión sobre la muestra, que es la fuerza por unidad de superficie, puede resultar enorme. A este dispositivo en el que dos caras de diamante opuestas aplican una presión contra una muestra se denomina celdilla de yunques de diamante.

El sencillo funcionamiento de la celdilla de yunques de diamante es el resultado alcanzado tras veinte duros años de evolución en el diseño. No encierra especial dificultad generar altas presiones dinámicas durante unas pocas millonésimas de segundo con una onda de choque, pero la generación de altas presiones estáticas se ofrece tan desafiante como el estudio de las propiedades de los materiales sometidos a esas presiones. Un primer problema básico a resolver es el de la naturaleza de la muestra de material que pretendemos investigar: las paredes del contenedor están sometidas a las mismas presiones que la muestra y, por tanto, ha de tenerse en cuenta el potencial de deformación o fractura del contenedor. Además, la presión sobre la muestra debe ser hidrostática, o igual en todas direcciones; lo que exige que la muestra incluida en la celdilla de altas presiones esté rodeada de un material blando o fluido. Si la muestra y el material hidrostático han de instalarse convenientemente en una celdilla para uso repetido, habrá un sistema de juntas que evite las posibles fugas de la celdilla. Finalmente, hay que determinar las propiedades de la muestra mientras la celdilla está sometida a una determinada presión; y si ha de estudiarse los efectos de variables tales como la temperatura a altas presiones, también se controlarán y medirán sin reducir la presión en el interior de la celdilla.

P. W. Bridgman, de la Universidad de Harvard, fue un pionero en el estudio de la materia sometida a altas presiones; durante más de medio siglo, hasta su muerte en 1961, investigó casi en solitario. No sólo estudió un número notable de elementos y compuestos sometidos a altas presiones: inventó las propias técnicas con las que trabajó. Introdujo un sistema de juntas para encerrar muestras entre dos yunques, colocados de forma opuesta uno con respecto al otro a lo largo de un eje, em-

ARANDELAS DE PRESION

BALANCIN DEL PISTON

PERNO DE PRESION

YUNQUES DE DIAMANTE

CUERPO DEL DISPOSITIVO

SOPORTE DEL PISTON

BALANCIN DEL PISTON

JUNTA

SOPORTE DEL PERNO DE PRESION

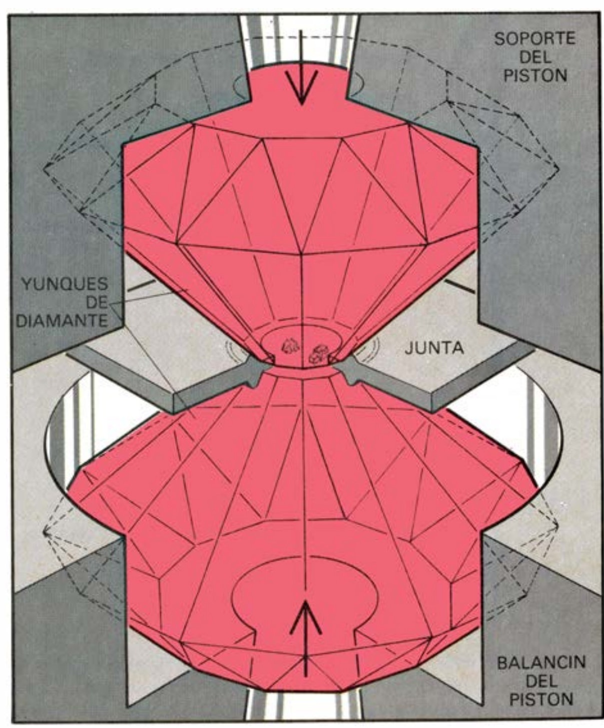
PISTON

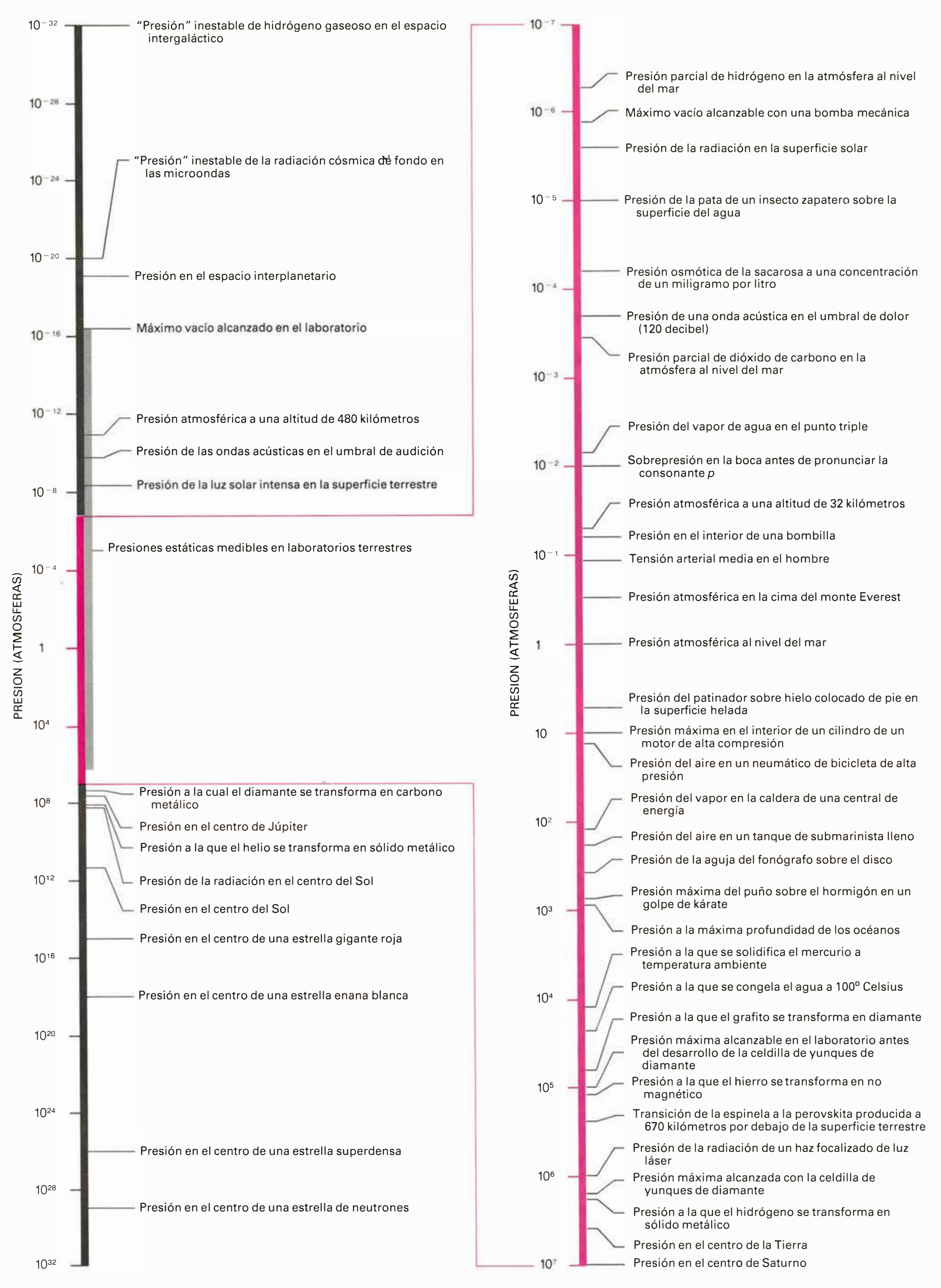
BRAZO DE PALANCA

SOPORTE DE PRESION DEL PISTON

VASTAGO DEL CUERPO (FULCRO)

1. MECANISMO DE EMPUJE DE LA CELDILLA DE YUNQUES de diamante desarrollado en el National Bureau of Standards, estadounidense. Es un dispositivo sencillo realizado en acero endurecido y ajustado a estrictas tolerancias. El mecanismo mostrado en el grabado superior constituye una versión ligeramente modificada de un aparato desarrollado en el Laboratorio de Geofísica de la Carnegie Institution de Washington; mide unos 20 centímetros de largo y pesa alrededor de tres kilogramos. En principio, su funcionamiento es similar al de un cascanueces común. El empuje se genera girando la varilla transversal del perno de presión en el sentido de las agujas del reloj. El brazo de palanca transmite este empuje a un pistón móvil, que está mecanizado en su parte superior para alojar la superficie redondeada de un balancín semicilíndrico. Un diamante con la punta aplanada se fija en su posición sobre la superficie plana del balancín. La cara plana de este diamante, que es el inferior mostrado en la ampliación de la derecha, se empuja contra la cara plana del diamante superior para producir la presión en la celdilla. El diamante superior también está montado en un balancín semicilíndrico, colocado con un giro de un ángulo recto con respecto al balancín inferior; el alineamiento paralelo de las caras de los diamantes se asegura inclinando los dos balancines hasta que las franjas de interferencia óptica producidas por ambas caras se reducen a un diagrama uniformemente gris. La celdilla es, simplemente, un pequeño orificio perforado en una hoja de acero montada entre las dos caras. En el interior de la celdilla se coloca una muestra del material a estudiar sometido a altas presiones, un rubí para la calibración de la presión y una gota de fluido para transmitir la presión uniformemente en todas direcciones. Al aplicar la presión, la hoja de acero es extruida alrededor de las caras de los diamantes; sirve así de junta para cerrar el contenido de material en la celdilla. El conjunto de arandelas de presión (tipo Belleville) actúa como un muelle para accionar el perno de presión. Cada arandela tiene la forma de una arandela normal con una deformación en cuña a lo largo de su eje perpendicular; pueden agruparse de suerte que las deformaciones estén orientadas a lo largo del perno en la misma dirección o en direcciones opuestas. La rigidez del muelle puede variarse colocando de forma diferente estas arandelas, con lo que puede regularse también la cantidad de empuje producido en una vuelta del perno. El dispositivo mostrado produce una presión de 1,7 millones de atmósferas. Ilustración de Walken Graphics.





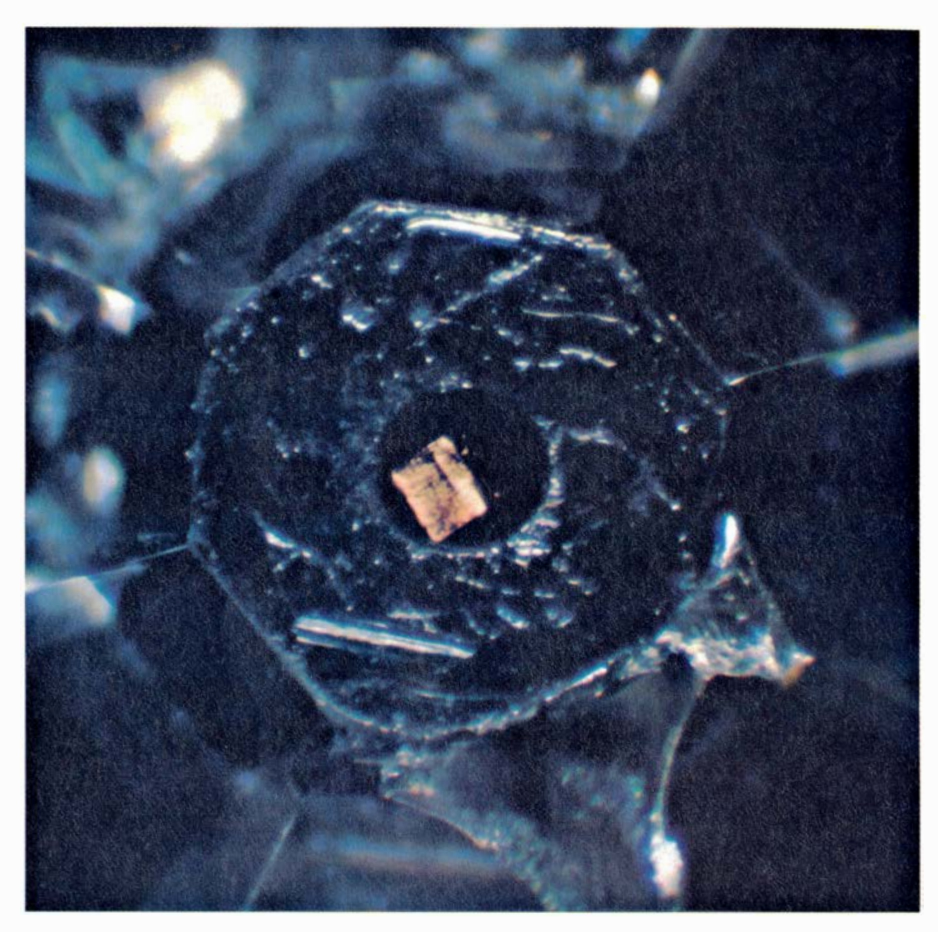
2. RANGO DE PRESIONES en el universo, representado en dos escalas logarítmicas. Dicha gama abarca más de 60 órdenes de magnitud. La escala de la derecha amplía la parte central de la escala de la izquierda. Con la celdilla de yunques de diamante se ha logrado aumentar en más de un orden de magnitud el anterior límite accesible para el estudio de altas presiones. Las transiciones mostradas para presiones mayores se predicen teóricamente.

pleando yunques de carburo de tungsteno, material éste extremadamente duro y de elevada resistencia a la compresión. Para mantener la presión hidrostática, rodeaba la muestra en el interior de la cámara de alta presión con cloruro de plata, un material sólido blando, capaz de transmitir la presión uniformemente sobre la superficie de la muestra.

En 1905, cuando no había salido aún de la universidad, Bridgman descubrió que, con un revestimiento de material blando, podía sellar una cámara de alta presión entre dos yunques. La presión sobre el material de cierre era siempre mayor que la presión en el interior de la cámara; el revestimiento servía, pues, de junta hermética a toda fuga aunque la presión fuera muy alta. Estos refinamientos fundamentales en la técnica le permitieron investigar las propiedades de la materia a presiones de hasta 100.000 atmósferas.

Los yunques de Bridgman están condicionados por la resistencia a la compresión del carburo de tungsteno y por la opacidad de este material a cualquier radiación. De ahí que quizá sorprenda por qué no empleó, desde el inicio, el diamante como yunque. Se sabía ya en su tiempo que el diamante era transparente a la luz y más duro que el carburo de tungsteno. También es transparente a los rayos X; se trata de la sustancia más dura que la ciencia conozca. A pesar de todo ello, hasta 1959 no se utilizó el diamante en un dispositivo de yunques para la investigación de altas presiones; lo hicieron Charles E. Weir, Ellis R. Lippincott, Alvin Van Valkenburg, Jr., y Elmer N. Bunting, del National Bureau of Standards, e independientemente John C. Jamieson, Andrew W. Lawson y Norman D. Nachtrieb, de la Universidad de Chicago. De entonces acá, en el National Bureau of Standards y en otros lugares se ha mejorado el dispositivo original hasta convertirlo en una precisa herramienta para la investigación cuantitativa a altas presiones.

¿Cómo se instala una muestra en la celdilla de yunques de diamante y se comprime hasta una presión determinada con antelación? Mi laboratorio tiene la fortuna de contar con la ayuda de Ralph G. Maines, un hábil relojero, que posee una gran destreza con herramientas de alta precisión que deben manipularse en el microscopio. Se empieza por preparar la celdilla de altas presiones, que no es otra cosa que un orificio perforado en un trozo de hoja metálica. Instalada esta hoja entre las caras de los dos diamantes, y alineado el orificio con el eje de empuje, podemos someter a alta presión la materia situada en el interior del orificio. A medida que se aplica la presión, las caras de ambos diamantes moldean por extensión el metal que rodea al orificio; de esta manera, el metal sirve de junta que sella el espacio que rodea a la muestra [*véase la figura 1*].



3. EL CAMBIO DE FASE SOLIDA de un cristal de monosulfuro de samario (SmS) da lugar a cambios espectaculares en el color y en las propiedades eléctricas del cristal. En esta microfografía realizada por el autor, el material dorado, fase de alta presión de la sustancia, puede verse a través de uno de los diamantes a lo largo del eje de empuje del dispositivo. Las facetas del diamante, ligeramente desenfocadas debido a la corta profundidad de campo en la microfografía, se observan también a través del diamante. El monosulfuro de samario es un semiconductor negro mate a presión atmosférica; la banda de valencia, o en otras palabras, la banda de mayor energía poblada por electrones en el material, está llena; la banda de energía situada encima mismo se halla vacía. Entre las dos bandas hay un estrecho nivel de energía poblado por electrones. A una presión de 7000 atmósferas el color negro cambia a dorado porque los electrones en este estrecho nivel son presionados hasta la banda vacía; el material comienza a conducir la corriente eléctrica como un metal. La fase dorada vuelve a la fase negra cuando remite la presión.

Para centrar el orificio en el eje de empuje, el trozo de metal es mordido por los diamantes; se perfora el orificio, de sólo 200 micrometros de diámetro, lo más cerca posible del centro de la muesca. Así pues, la celdilla de alta presión que se obtiene es un cilindro de 200 micrometros de diámetro y tan profundo cuan gruesa sea la hoja metálica: unos 100 micrometros. La junta se asienta sobre la cara del diamante inferior con la misma orientación que tenía cuando se realizó la muesca. Se colocan, entonces, en el orificio el material de la muestra y un pedacito de rubí que sirve para calibrar la presión. Finalmente, para mantener hidrostática la presión, se rellena el orificio con una gota de fluido mediante una jeringa, para, a continuación, sellarse rápidamente por las caras de los diamantes antes de que se evapore el fluido.

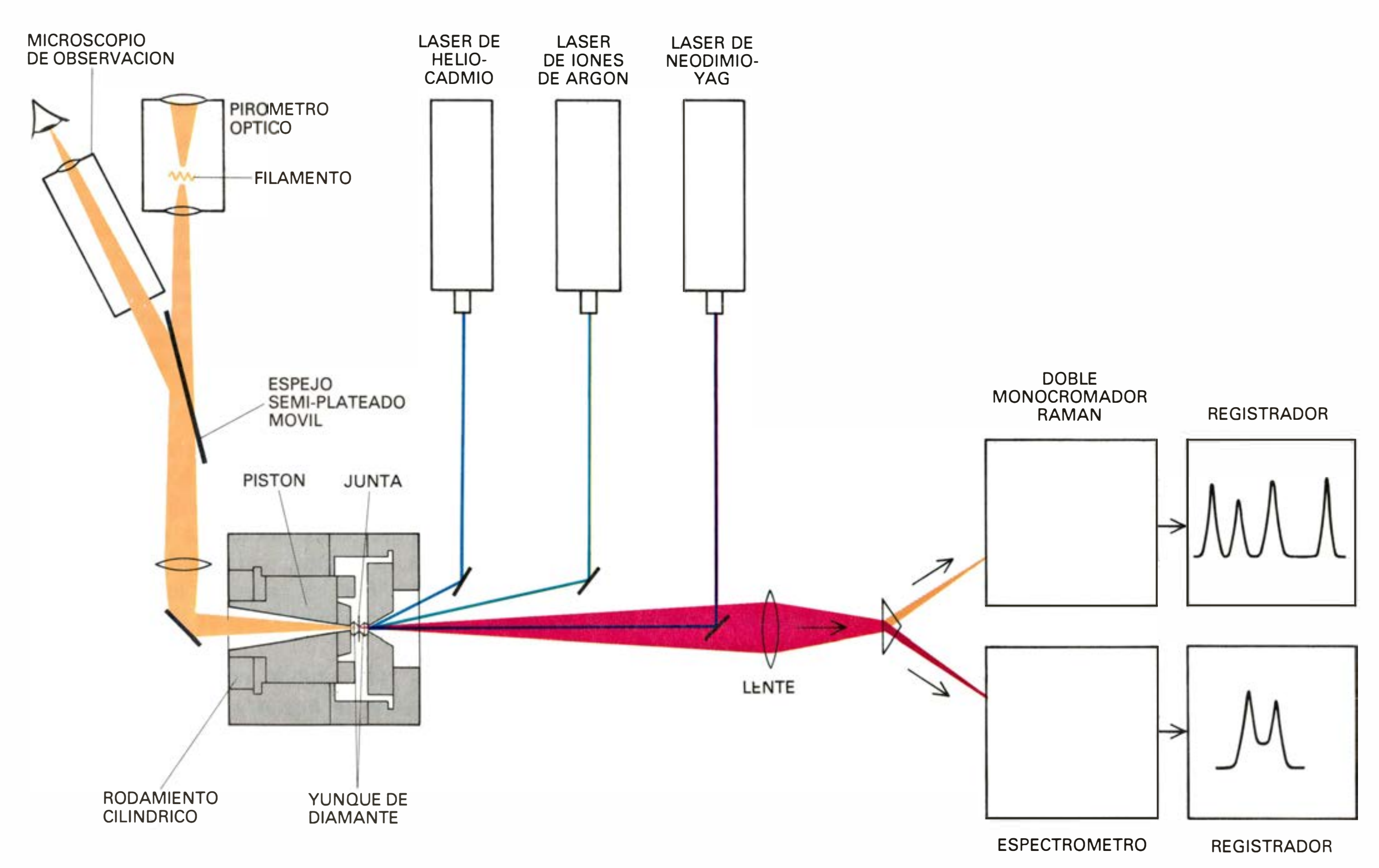
El rubí situado en la celdilla junto con la muestra permite determinar la presión con un alto grado de precisión. Sin él, el pequeño tamaño de la celdilla haría bastante difícil la calibración de la presión, ni el valor científico del instrumento sería lo que es. Excitado por la luz, el rubí fluoresce con un rojo intenso y fuerte. La emisión fluorescente puede resolverse por medio de un espectrógrafo en dos picos cuyas longitudes de onda son conocidas con exactitud a presión atmosférica. Cuando aumenta la presión sobre el rubí, los picos de fluorescencia se desplazan hacia longitudes de onda superiores. El

desplazamiento se ha calibrado para presiones conocidas en soportes independientes; el desplazamiento de los picos medido en el espectro del rubí es, pues, una medida indirecta de la presión. Este desplazamiento espectral de los picos viene a ser, casi exactamente, proporcional a la presión para presiones de hasta 300.000 atmósferas; para otras superiores, el desplazamiento espectral es algo menor ante un incremento dado de la presión, si bien ésta puede estimarse aún a partir de la fluorescencia.

Varios materiales se emplean ya como fluidos hidrostáticos en la celdilla. El más adecuado es una mezcla de cuatro partes de metanol por una de etanol; mas, por encima de las 104.000 atmósferas de presión, la mezcla se congela y su acción ya no es estrictamente hidrostática. Las presiones hidrostáticas pueden mantenerse, hasta alrededor de 300.000 atmósferas, sumergiendo la celdilla en nitrógeno líquido y atrapando a continuación en ella un gas noble, xenón por ejemplo. Este, que se congela a alrededor de −112° grados Celsius, constituye un excelente medio hidrostático en su estado sólido y no reacciona químicamente con la muestra. A presiones mayores, el helio y el hidrógeno sólidos aparentan ser hidrostáticos hasta al menos 700.000 atmósferas, pero requieren que la celdilla se encuentre refrigerada a una temperatura de sólo unos grados por encima del cero absoluto, o que se disponga de un medio de suministrar el hidrógeno o el helio a la celdilla cuando está a alta presión.

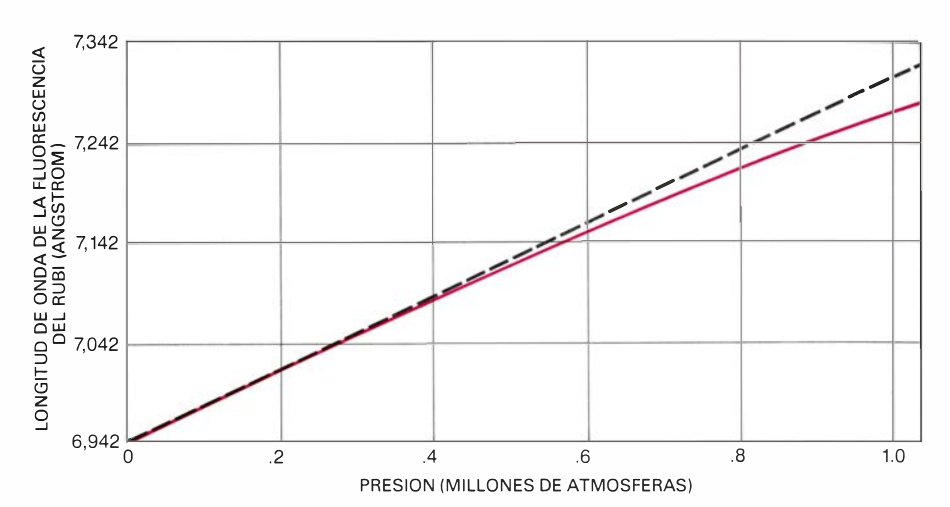
Una vez cargada y presurizada la celdilla, el diamante actúa como una ventana; los cambios que se registran, con la presión, en el color o en el brillo de la muestra pueden observarse directamente en el microscopio. En 1970 se descubrió una espectacular transición visual en el monosulfuro de samario (SmS). A presión atmosférica, esta sustancia es un semiconductor negro mate: material cuya conductividad eléctrica está entre la de un metal y la de un aislante. Sin embargo, cuando la presión se aumenta hasta 7000 atmósferas, el monosulfuro de samario comienza a brillar como el oro y conduce la corriente eléctrica con una baja resistencia, como en los metales. Si la presión remite luego, reaparece el semiconductor negro mate; el color de la muestra visto en el microscopio oscila entre el negro y el dorado con un simple giro de rosca sobre la celdilla de yunques de diamante.

Los cambios de color y conductividad eléctrica en el monosulfuro de samario resultan de una transición de fase en el material inducida por la presión. Las fases, o estados, más familiares de una sustancia son: sólida, líquida y gaseosa; en la mayoría de las sustancias, sin embargo, hay también fases sólidas diferentes. De la fase sólida estable, o de cualquier fase estable de un sistema,



4. PERMITE LA TRANSPARENCIA DEL DIAMANTE realizar medidas ópticas precisas de las propiedades de una muestra sometida a altas presiones en la celdilla. El sistema experimental mostrado en el diagrama ilustra algunas de las mediciones que pueden llevarse a cabo. Para determinar la presión se enfoca el haz de un láser de helio-cadmio (*azul*) sobre un rubí situado en la celdilla, lo que causa la fluorescencia del mismo (*rojo*). Un espectrómetro mide el desplazamiento de la longitud de onda de la fluorescencia del rubí, desplazamiento que indica la presión en la celdilla. El haz de un láser de iones de argón (*verde*) puede ser enfocado sobre la muestra; ésta responde emitiendo luz por dispersión Raman (*amarillo*), que posee una frecuencia inferior a la de la luz verde incidente. La coincidencia en el espacio de las emisiones roja y amarilla se muestra en naranja. El análisis de la luz dispersada por efecto Raman con el doble monocromador (un espectrómetro de muy alta resolución) hace posible determinar la frecuencia vibracional de los enlaces interatómicos y con ello medir la fuerza de éstos cuando están sometidos a diversas presiones. Finalmente, la muestra puede calentarse hasta 2000 grados Celsius por un haz (*morado*) generado por un tercer láser, de neodimio-YAG (granate de itrio y aluminio). La temperatura se mide con un pirómetro óptico, un dispositivo en el que el color incandescente de la muestra calentada se hace corresponder visualmente con el color de un filamento brillante de lámpara, de temperatura conocida. Así, la muestra puede estudiarse a las altas presiones y temperaturas que se encuentran en las profundidades terrestres.

se dice que está en equilibrio termodinámico con el medio que la rodea. Después de un prolongado contacto con la temperatura y la presión del medio, la energía total (es decir, la suma de las energías cinética y potencial) almacenada ha de alcanzar un valor mínimo. La energía total de un sólido puede menguar por cambios en la configuración de los átomos que forman el sólido o por cambios en la estructura energética de los electrones del sólido. Por tanto, cuando el volumen de un sólido se reduce por compresión, su estructura electrónica o atómica puede verse obligada a cambiar para alcanzar el equilibrio energético con el nuevo entorno. Estos cambios llegan a alterar sustancialmente las propiedades físicas de un sólido. Para el investigador de la física de altas presiones, el descubrimiento de una transición de fase inducida por la presión constituye una experiencia altamente gratificante.



5. CALIBRACION DE PRESION en la celdilla de altas presiones basada en la variación de la longitud de onda de la fluorescencia del rubí con la presión. Un incremento en la presión da lugar a un aumento proporcional en la longitud de onda para presiones de hasta 300.000 atmósferas (*curva continua en color*). Para presiones mayores, hay una pequeña desviación de la proporcionalidad (*línea a trazos en negro*). La escala fue determinada por J. Dean Barnett, Stanley Block y Gasper J. Piermarini, del National Bureau of Standards, y por Ho-kwang Mao y Peter M. Bell, del Laboratorio de Geofísica de la Carnegie.

Una de las predicciones más incitantes de la teoría de sólidos afirma que, para presiones de un millón a varios cientos de millones de atmósferas, muchas sustancias que son gases a temperaturas y presión atmósferica normales se transforman en sólidos metálicos. Se cree, por ejemplo, que el hidrógeno se transforma en metálico a una presión aproximada de unos dos millones de atmósferas, acercándose este valor a 110 millones de atmósferas en el caso del helio. Aunque no se han alcanzado presiones estáticas tan altas, la celdilla de yunques de diamante permite comprobar la teoría sobre la que se basan estas predicciones en unas condiciones experimentales más accesibles.

Que un sólido sea o no metálico viene determinado por la estructura de las bandas de energía de sus electrones. En un átomo aislado, los electrones ocupan niveles de energía discretos; ahora bien, cuando se juntan muchos átomos para formar un sólido, estos niveles se ensanchan en bandas de energía. El ensanchamiento es un efecto mecanicocuántico: se produce porque dos electrones que ocupan el mismo nivel energético en dos átomos muy distantes tienen que alcanzar niveles de energía ligeramente diferentes al hallarse confinados en un volumen pequeño. Por tanto, las bandas de energía de los electrones en un sólido están formadas por muchos niveles de energía discretos, quizá 10^{23}; mas los niveles se hallan tan apretados que no pueden distinguirse. Las bandas de energía adyacentes en un sólido pueden solaparse o estar separadas por un intervalo ("gap") que representa la banda "prohibida" de energía para los electrones del sólido.

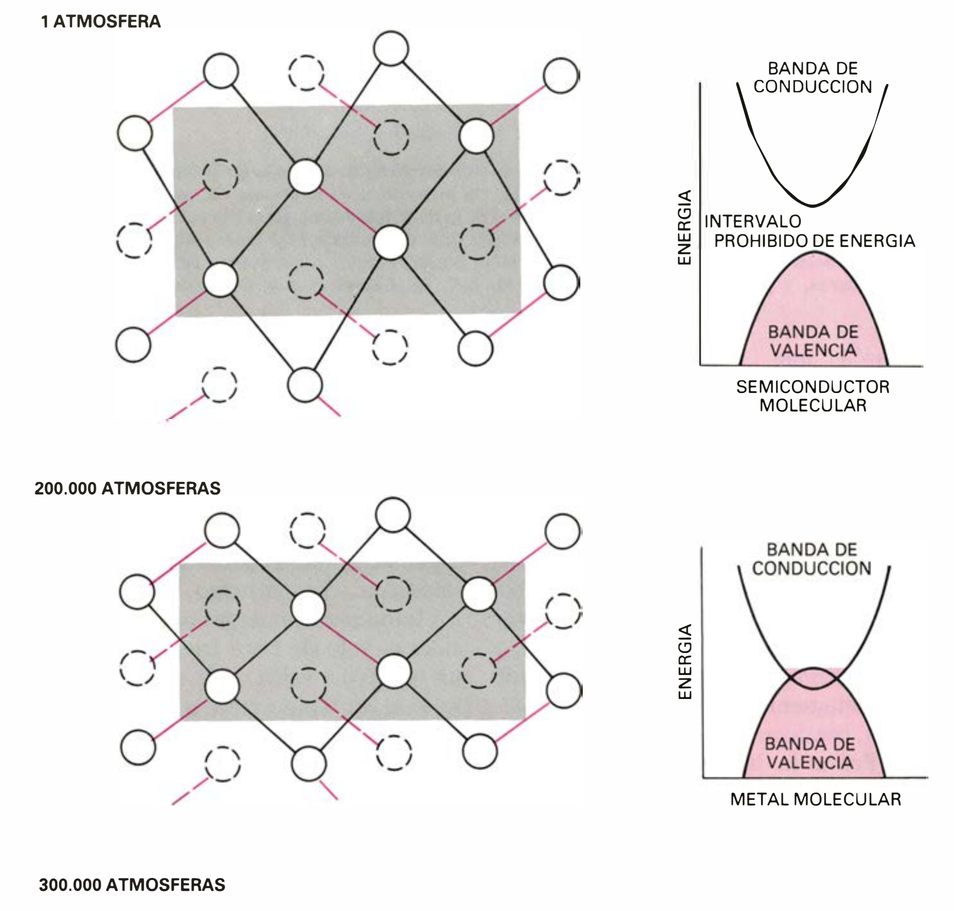
Si los electrones más energéticos del sólido llenan completamente una de las bandas de energía y existe un intervalo prohibido entre esta banda llena y la banda de energía inmediata superior, nos encontramos ante un aislante eléctrico. Por contra, si la banda de mayor energía sólo está parcialmente llena, o si está vacía pero se solapa con la banda completamente ocupada, el sólido, metálico, conduce bien la corriente eléctrica. Prevé la teoría que el intervalo prohibido entre las bandas de un sólido, que confiere a éste el carácter de aislante, pueda estrecharse a altas presiones y comprimirse hasta su final cancelación. Una vez que el umbral energético de la banda de energía vacía cruza el límite de la banda llena, se cumple una condición suficiente de la conducción metálica; el aislante debería convertirse en un sólido metálico. Cálculos del estilo de los realizados para el hidrógeno y el helio indican que ese fenómeno debería producirse en otros materiales a presiones accesibles con la celdilla de yunques de diamante. En este sentido, se estima que, para el xenón, la transición metálica ocurriría a unos 1,3 millones de atmósferas; para el iodo, en torno a las 200.000 atmósferas.

El xenón sólido es un aislante eléctrico. La diferencia energética del intervalo prohibido que está asociada con sus propiedades como aislante es bastante alta: nueve electronvolt a presión atmosférica. Tan ancho intervalo prohibido determina también la transparencia a la luz del xenón sólido. Los fotones de luz son absorbidos por un aislante en el caso exclusivo de que tengan energía suficiente para hacer saltar un electrón a través del intervalo; la absorción de fotones a energías menores requeriría que un electrón saltara a un lugar de la banda prohibida, lo que es imposible. Sin embargo, la energía de los fotones más energéticos de la luz visible es sólo de unos tres electronvolt, un tercio del valor de la energía del intervalo prohibido para el xenón. El estrechamiento de la banda prohibida, requisito previo para la transición de aislante a metal, sería por tanto visible en una celdilla de yunques de diamante. El xenón sólido, transparente a presión atmosférica, se tornaría opaco a medida que aumentara la presión.

Medidas espectroscópicas recientes de la absorción de luz por el xenón sólido indican que la anchura del intervalo prohibido disminuye hasta alrededor de cuatro electronvolt a una presión de 600.000 atmósferas. Esta reducción del intervalo prohibido de energía con la presión concuerda con la dirección de cambio esperada, pero el xenón permanece como aislante transparente a 600.000 atmósferas. Aunque nadie ha visto todavía el xenón sólido transformarse en opaco a la luz, en 1979 se midió la resistividad eléctrica de una película delgada suya, comprimiendo la membrana entre una pequeña punta esférica de diamantes y una cara plana del mismo material. La presión sobre el xenón no puede calibrarse en esta clase de dispositivo con la exactitud de la celdilla de yunques de diamante; ahora bien, para una presión estimada de más de 1,3 millones de atmósferas, la resis-

tividad del xenón era bastante baja. Es probable, por tanto, que la transición a la fase metálica se haya observado en ese elemento, pero se necesita una más amplia comprobación experimental.

Para el iodo, la transición de la fase aislante a la fase metálica está plenamente establecida. A presión atmosférica, se trata de un cristal eléctricamente aislante, formado por moléculas diatómicas de iodo. Veinte años atrás, Harry G. Drickamer y sus colaboradores, de la Universidad de Illinois, investigaron la resistencia eléctrica del iodo sometido a presión. Observaron una disminución, amplia y continua, en el valor de la resistencia a medida que la presión subía hasta 200.000 atmósferas. Apoyados en este resultado, sugirieron que el iodo sólido se convertía en metálico al sufrir una presión, pero no consiguieron demostrar si el cristal metálico de iodo lo constituían átomos o moléculas diatómicas.



6. ESTRUCTURA DEL IODO a tres presiones diferentes. La configuración de los átomos de iodo en el sólido cristalino se muestra a la izquierda; la correspondiente estructura en energía de los electrones se encuentra a la derecha. A presión atmosférica, la unidad básica del cristal es la molécula diatómica (I_2); el sólido es un semiconductor porque hay un salto entre la banda de valencia que está llena de electrones (*color*) y la banda de conducción que está vacía. Cuando la presión se aumenta hasta 200.000 atmósferas, las moléculas adoptan una configuración más ordenada y estrechamente compacta; y el intervalo prohibido ("gap") entre ambas bandas se acorta hasta que se solapan, transformándose el cristal molecular en un metal eléctricamente conductor. A unas 210.000 atmósferas se produce una transición abrupta hacia una fase atómica metálica; a 300.000 atmósferas los átomos forman, en esta fase, un cristal muy ordenado y la banda de valencia sólo llega a estar parcialmente llena, de manera parecida a la banda de mayor energía de un metal ordinario. Los átomos y enlaces situados en el plano del papel se distinguen mediante líneas y círculos continuos, en tanto que los átomos y enlaces que no están en el plano del papel se muestran como círculos y líneas a trazos. Los enlaces intramoleculares se señalan en color; los otros enlaces se presentan en negro. Las estructuras del iodo a altas presiones fueron determinadas por K. S. Takemura, S. Minomura, O. Shimomura y Y. Fujii, del Instituto japonés de Física del Estado Sólido con sede en Tokio.

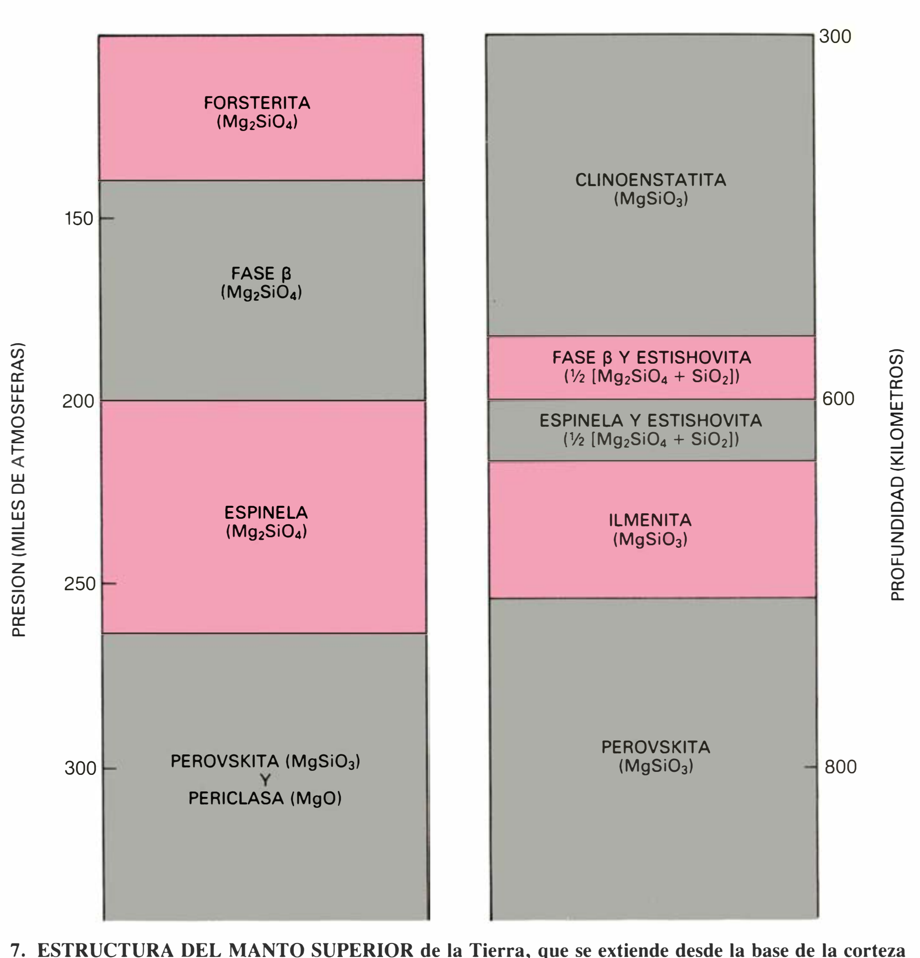
Sólo en los últimos años, los estudios de altas presiones realizados con la celdilla de yunques de diamante han aclarado la cuestión. Por ser el diamante transparente a los rayos X, la estructura atómica de los materiales sometidos a cierta presión en la celdilla puede investigarse a través del método de la difracción de rayos X. El diagrama de rayos X reflejado por la red atómica de un material permite determinar la estructura y configuración de la red. Por estudios de diagramas de rayos X se sabe que el iodo deviene gradualmente metálico en forma cristalina molecular, debido a que comienzan a solaparse una banda de energía ocupada con electrones y una banda vacía. A una presión de cerca de 210.000 atmósferas, sin embargo, el cristal molecular se transforma abruptamente en monoatómico; la estructura de las bandas electrónicas cambia entonces por completo. Si bien el cristal permanece metálico en su fase monoatómica, la alta conductividad eléctrica en dicha fase débese a una banda parcialmente llena, no al solapamiento de dos bandas.

Las tres etapas de la transformación de la fase metálica del iodo han cobrado importancia en los estudios experimentales sobre el comportamiento del hidrógeno sólido. Hay especial interés en producir hidrógeno metálico porque, de acuerdo con la teoría, se presume que el hidrógeno metálico sería superconductor a temperaturas relativamente altas; en otras palabras, conduciría la corriente eléctrica sin resistencia a temperaturas muy por encima de las requeridas por otros materiales para transformarse en superconductores. Por otra parte, se cree que el interior de los planetas gigantes como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno consta principalmente de hidrógeno. De ahí que el conocimiento de las propiedades del hidrógeno a altas presiones importe para el estudio de estos planetas.

A temperatura ambiente, el hidrógeno molecular se condensa a una presión cercana a las 57.000 atmósferas para fomar un sólido de color claro, aislante en términos eléctricos y altamente compresible. Este sólido es un cristal molecular cuya unidad fundamental es la molécula diatómica de hidrógeno (H_2). En analogía con la transición metálica en el iodo molecular sólido, la investigación actual del hidrógeno sólido se plantea la cuestión siguiente: ¿remeda

el hidrógeno el comportamiento del iodo y se transforma en metálico por disociación en una red monoatómica, o permanece en forma molecular y se transforma en metálico por solapamiento de dos bandas de energía?

Dos grupos de investigación han ido por delante en el estudio del hidrógeno y su isótopo, el deuterio, a altas presiones. En el Laboratorio de Geofísica de la Carnegie Institution de Washington se ha determinado la fuerza del enlace en hidrógeno y deuterio moleculares (hidrógeno pesado o hidrógeno 2) para varias presiones por medio de la espectroscopía Raman. Esta técnica espectroscópica, así denominada en honor del físico hindú C. V. Raman, depende de la medida de la frecuencia de la luz dispersada por una muestra sometida a altas presiones; en consecuencia, esta medida no podría efectuarse si no fuera por la transparencia de los diamantes que confinan la muestra en la celdilla. La fuerza de un enlace molecular puede compararse con la rigidez de un resorte helicoidal que da lugar a una oscilación de una frecuencia característica a la que vibra el resorte por compresión y expansión. Así pues, la fuerza del enlace molecular entre dos átomos puede determinarse midiendo la frecuencia vibracional del enlace.



7. ESTRUCTURA DEL MANTO SUPERIOR de la Tierra, que se extiende desde la base de la corteza terrestre hasta una profundidad de alrededor de 670 kilómetros. Se ha estudiado experimentalmente acoplando un láser a una celdilla de yunques de diamante para calentar el material en el interior de aquélla. Las transiciones de fase para la forsterita, un componente del olivino, y de la clinoenstatita, un componente del grupo de minerales piroxénicos, se representan junto con la profundidad y la correspondiente presión en el interior de la Tierra. Los nombres de espinela, perovskita e ilmenita denotan estructuras cristalinas; se refieren a minerales que tienen la misma composición química que la forsterita y la clinoenstatita y la misma forma cristalográfica que los minerales encontrados en la superficie terrestre, que se conocen generalmente por esos nombres. La secuencia de las transiciones de fase mostradas se basa en las investigaciones de Lin-gun Liu, de la Universidad Nacional de Australia. Aunque la forsterita y la clinoenstatita son dos de los minerales más abundantes en el manto, la presencia de óxidos de hierro, aluminio y calcio desplaza probablemente los límites de la transición y puede dar lugar a fases adicionales de alta presión. Desde una profundidad de aproximadamente 670 kilómetros hasta el límite núcleo-manto a 2900 kilómetros, se desconoce la composición; se supone que es la misma que la del manto superior.

Para proceder a la medición, se enfoca un haz intenso de luz azul emitido por un láser sobre la muestra sometida a cierta presión en la celdilla de yunques de diamante. La luz azul interacciona con el estado vibracional de las moléculas en la muestra y aparece dispersada como luz verde, de menor frecuencia que la azul. La diferencia entre las frecuencias de ambos colores es exactamente igual a la frecuencia vibracional del enlace molecular. Midiendo con un espectrómetro la frecuencia de la luz dispersada, determinaremos, pues, la frecuencia vibracional del enlace. El desplazamiento de la luz incidente hacia una frecuencia menor se denomina desplazamiento Raman.

Los investigadores del Laboratorio de Geofísica han descubierto que, a 300.000 atmósferas, la frecuencia vibracional del enlace interatómico en el hidrógeno molecular comienza a disminuir, mientras que para el deuterio molecular dicha disminución empieza a una presión de más de 400.000 atmósferas. De acuerdo con esos hallazgos, la fuerza de los enlaces disminuye a dichas presiones y los enlaces continúan debilitándose hasta 700.000 atmósferas, por lo menos. En consecuencia, parece probable que el cristal de hidrógeno molecular acabe por convertirse en monoatómico al ser sometido a una presión adicional; la transformación de hidrógeno en metal podría atravesar perfectamente por las mismas etapas que cubre la transformación del iodo.

Un segundo grupo, éste en la Universidad de Amsterdam, ha abordado el cambio que sufre el volumen del hidrógeno sólido molecular con el incremento de la presión. Hasta hace poco, la compresibilidad del hidrógeno se había determinado solamente para presiones de hasta 20.000 atmósferas; Isaac F. Silvera y sus colaboradores han extendido el rango de ese comportamiento hasta 370.000 atmósferas. Su método es simple y directo. En el orificio de la junta de cierre se coloca el rubí para la calibración de la presión; el resto del orificio se rellena con hidrógeno. Para cada incremento de presión se mide en el microscopio el diámetro del orificio, determinándose su espesor a partir de los diagramas de interferencia de la luz que se observa a través del agujero. Por el desplazamiento en el espectro de fluorescencia del rubí se conoce la presión y, por otros métodos, el cambio en el volumen del rubí; por tanto, podemos representar el volumen de hidrógeno que llena el resto de la celdilla en función de la presión.

Los resultados de Silvera se corroboran por una medida completamente distinta del cambio de volumen con la presión, llevada a cabo en el Laboratorio de Geofísica. A cualquier temperatura por encima del cero absoluto, parte de la energía térmica de un sólido se libera por ondas acústicas, u ondas periódicas de compresión y expansión del medio material, que se propagan en

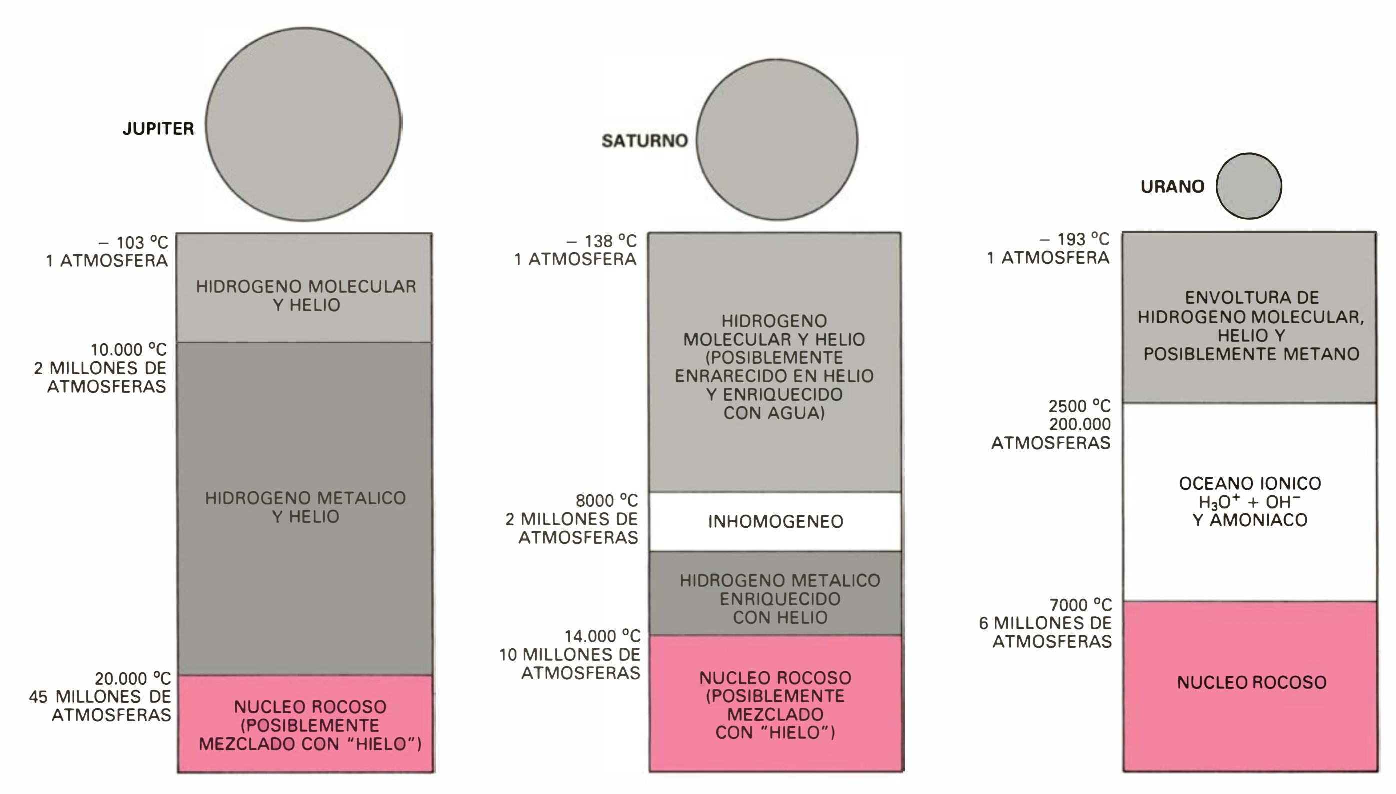
todas direcciones a través de dicho sólido. El método de la espectroscopía por dispersión Brillouin, así denominada en honor del físico francés Louis Marcel Brillouin, que se caracteriza por su elevada sensibilidad, permite medir las velocidades de las ondas acústicas. Como la espectroscopía Raman, la espectroscopía por dispersión Brillouin realizada en muestras a altas presiones depende de la transparencia del contenedor de la muestra; una vez más, esto sólo lo hace factible la celdilla de yunques de diamante.

Sobre la muestra de hidrógeno sólido se enfoca la luz monocromática de un láser; las ondas acústicas de la muestra reflejan en todas direcciones parte de la luz. A lo largo de una dirección dada, la frecuencia del haz de luz reflejado cambia debido al movimiento de la onda acústica por la que se refleja: la distancia entre las sucesivas crestas de la onda de luz reflejada aumenta, si la onda acústica se mueve alejándose del haz incidente; disminuye, si la onda acústica se mueve hacia el haz incidente. Este fenómeno es el conocido efecto Doppler. La velocidad de una onda acústica en un medio sólido depende de la densidad del medio. Por tanto, midiendo el desplazamiento de la frecuencia de la luz que se refleja en la muestra de hidrógeno sometida a cierta presión, puede calcularse la densidad del hidrógeno sólido a la presión aplicada. Resulta, así, inmediato determinar el volumen de hidrógeno a partir de su densidad.

Los nuevos datos ofrecidos por los dos grupos nos facultan para extrapolar la presión de transición de la fase metálica del hidrógeno con mayor seguridad que antes. Las mejores estimaciones sugieren que la transición debería producirse a presiones entre dos y seis millones de atmósferas, según los factores de corrección que intervienen en los cálculos. No se conoce todavía si la transición puede observarse en la celdilla de yunques de diamante.

Entre las aplicaciones más importantes de los estudios realizados con este dispositivo están las correspondientes a la geofísica y la ciencia planetaria. Le parece al experimentalista una ironía del destino que bajo nuestros pies exista un laboratorio gigante de altas presiones, cuando él debe contentarse con muestras casi microscópicas de material. En el interior de la Tierra y los demás planetas, la presión y la temperatura aumentan con la profundidad, alcanzándose en el núcleo terrestre valores de cuatro millones de atmósferas y 4000 grados Celsius, respectivamente. Para entender el origen y la dinámica de un planeta resulta imprescindible conocer los cambios en densidad, fase y composición química del planeta con la profundidad, parámetros todos ellos afectados por cambios en la presión y la temperatura. Con el apoyo principal de datos sísmicos, se acepta que el interior de la Tierra se divide en núcleo, manto y corteza. A uno le gustaría simular las condiciones de presión y temperatura a diversas profundidades de cualquier planeta para observar directamente sus efectos sobre las sustancias de las que se supone constituido.

Antes de la aparición de la celdilla de yunques de diamante, tales estudios directos sólo eran posibles para condiciones de presión y temperatura que correspondieran a una profundidad de alrededor de 400 kilómetros. Había dificultad no sólo en simular presiones mayores, sino también en calentar los materiales sometidos a presión hasta una temperatura prefijada. La cualidad de la transparencia del diamante ha servido para resolver el problema del calentamiento. En la Universidad de Ro-



8. COMPOSICION INTERNA DE LOS TRES PLANETAS GIGANTES deducida a partir de cálculos teóricos, basados, cuando ha sido posible, en la extrapolación de resultados experimentales. Las investigaciones del iodo sólido a altas presiones sugieren que el hidrógeno molecular sólido debería presentar transiciones de fase similares y convertirse en un metal conductor a una presión de entre dos y seis millones de atmósferas. Por tanto, se supone que, a profundidades de los planetas correspondientes a tales presiones, el hidrógeno se encuentra en forma metálica. La diferenciación adicional de las estructuras planetarias se apoya en estudios espectroscópicos y en extrapolaciones teóricas. Los "hielos" del núcleo de Júpiter y Saturno son de tres clases: amoníaco sólido, metano sólido y hielo común. Los modelos fueron desarrollados por David J. Stevenson, del Instituto de Tecnología de California.

chester, Li-chung Ming y William A. Bassett demostraron que, enfocando un haz de un láser de granate de aluminio e itrio a través de un diamante sobre la muestra, ésta podía calentarse rápidamente hasta alrededor de 2000 grados Celsius. La temperatura puede medirse observando el color de la muestra calentada. De ahí que la celdilla de yunques de diamante se ha convertido, en manos del geofísico, en una ventana abierta al interior de la Tierra, para condiciones que corresponden a niveles hondísimos, verbigracia, el límite entre el núcleo y el manto, a 2900 kilómetros bajo la superficie.

Se llegó a un hallazgo fundamental: los minerales de silicatos formados por dióxido de silicio (SiO_2), óxido de magnesio (MgO), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (FeO) experimentan una serie de transformaciones o cambios de fase inducidos por la presión. Cada transformación de éstas produce cambios en la densidad; éstos se correlacionan con los observados en la velocidad de las ondas sísmicas a medida que crece la profundidad. Se han relacionado con datos sísmicos dos transiciones de fase importantes. En primer lugar, se cree que el brusco incremento en la velocidad de las ondas sísmicas a una profundidad de alrededor de 400 kilómetros está causado por un cambio de fase del olivino, silicato de magnesio y hierro [$(Mg,Fe)_2\ SiO_4$], a una estructura más densa llamada espinela. En segundo lugar, y de modo parecido, el aumento en la velocidad de las ondas sísmicas a una profundidad de 670 kilómetros se asocia a un cambio de la espinela a la estructura conocida como perovskita. La fase de la perovskita aparenta ser estable; se cree que predomina en todo el manto inferior. Hay otras anomalías en las velocidades sísmicas causadas también, probablemente, por cambios de fase. Estos podrían venir inducidos por minerales de silicatos menos abundantes: óxido de calcio (CaO) u óxido de aluminio.

Las condiciones que prevalecen en la materia de los planetas gigantes no se han hecho todavía accesibles a la simulación directa con la celdilla de yunques de diamante. Se estima, en este sentido, que en el centro de Júpiter, reina una presión de unos 45 millones de atmósferas y, de 10 millones de atmósferas, en el centro de Saturno. Ambas presiones son un orden de magnitud mayores que la presión máxima registrada hasta ahora con la celdilla de yunques de diamante. No obstante, los experimentos de altas presiones con materiales tales como el hidrógeno permiten construir modelos teóricos más acordes con la composición y la dinámica del interior de los planetas.

Se supone que el hidrógeno predomina en Júpiter y Saturno, y que se halla en fase metálica a profundidades por debajo de la correspondiente a la presión de la transición a dicha fase. En el núcleo de ambos planetas podría haber óxidos minerales de magnesio, silicio y hierro, así como tres clases de "hielo": amoníaco sólido, metano sólido y hielo común. Los hielos son, probablemente, constituyentes menores en Júpiter y Saturno, e importantes, por contra, en el núcleo de Urano y Neptuno.

Así las cosas, la pregunta es obvia: ¿cuál es la máxima presión que puede alcanzarse con la celdilla de yunques de diamante? Un límite lo impondría una transición de fase en el propio diamante, quizás a una fase metálica. Ming-tang Yin y Marvin L. Cohen, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron, a través de cálculo, que la estructura del diamante no se colapsaba en ninguna de las conocidas estructuras metálicas cristalinas para presiones menores de 23 millones de atmósferas. Por otra parte, se estima, no sin excesiva prudencia, que el diamante es estable frente a cualquier otra transición de fase metálica hasta presiones de 10 millones de atmósferas, al menos. Para nuestra desgracia, el diamante es susceptible de presentar una deformación plástica a presiones que están por debajo de la transición de fase metálica; por esta razón, la presión final que puede alcanzarse con la celdilla de yunques de diamante vendrá determinada, probablemente, por el límite de elasticidad.

Por la teoría de la plasticidad se sabe que el límite de elasticidad del diamante es máximo en las zonas donde la estructura cristalina es perfecta. Así, se estima que en un diamante cabal podrían alcanzarse presiones de hasta cinco millones de atmósferas antes de que comenzara a ceder. Cuanto menor sea la zona de un diamante que deba soportar la máxima presión, mayor posibilidad habrá de que esa zona goce de una perfecta estructura cristalina. Parece, pues, que sólo conseguiremos presiones mayores a través de experimentos a escala cada vez menor. No deja de resultar divertido que los beneficios de la miniaturización, tan familiares en electrónica, lleven quizás al investigador hacia presiones mucho mayores, como las existentes en el interior de los objetos más grandes y con mayor masa del universo.

Ciencia y sociedad

Zona de esterilidad

Se afirma a menudo que el elevado índice de fertilidad de los países africanos que quedan al sur del Sahara (así como de otras naciones subdesarrolladas) constituye uno de los obstáculos principales que se oponen a su progreso económico. Las culturas africanas alientan la procreación: en muchas partes del trópico las mujeres alcanzan una media de 10 hijos. Lo que coexiste con el problema antagónico, y más grave: en ciertas zonas de Africa central se asiste a una incapacidad reproductora. Por ejemplo, en 1960, más de la mitad de las jóvenes de varios distritos del Zaire y de la República Centroafricana eran estériles, antes incluso de haber tenido hijo alguno. Según concluyen John C. Caldwell y Pat Caldwell, de la Universidad Nacional de Australia, en un artículo que aparece en *World Health Statistics Quarterly*, la infertilidad es el estigma dejado por una prolongada epidemia de gonorrea que data de la llegada de los colonizadores, en 1870.

La zona de baja fertilidad del Africa central abarca dos áreas, que afectan a los estados modernos de Sudán, República Centroafricana, Zaire, Gabón y Camerún. La población de esa zona es de unos 10 millones de habitantes. Aunque las dos áreas están próximas, no son contiguas; entre ellas queda una franja donde los valores de fertilidad corresponden a la media del Africa tropical. Las poblaciones africanas no afectas de esterilidad presentan una tasa de fertilidad entorno a 6,5. La tasa de fertilidad total es el número medio de hijos que tendrían las mujeres a lo largo de todo su período reproductivo de mantenerse el nivel de fertilidad actual. Las poblaciones de la zona de baja fertilidad presentan una tasa total inferior a 5.

En ciertos lugares de la zona, el descenso ha sido notable. Durante la década de 1950, la tasa de fertilidad total del distrito de Uele, al norte del Zaire, fue de 3. "Indican esos niveles, escriben los Caldwell, que la esterilidad patológica ha debido dividir por dos el número de nacimientos". Entrevistas mantenidas con mujeres en el norte del Zaire confirman esa reducción de la fertilidad a la mitad.

En Occidente, un nivel comparable de falta de descendientes entre las jóvenes puede ser voluntario, pero desde luego no es ese el caso de Africa central. Todas las inspecciones demográficas realizadas en Africa tropical señalan que hombres y mujeres desean prolongarse en familias numerosas. Un estudio efectuado por los Caldwell en la ciudad nigeriana de Ibadán, fronteriza a la zona de baja fertilidad, muestra que sólo un 1 por ciento de las mujeres había limitado voluntariamente su descendencia a menos de 6 hijos. Hace sólo 14 años, únicamente un 2 o 3 por ciento de las mujeres casadas de la costa africana de lengua francesa utilizaba anticonceptivos; en el interior prácticamente ninguna mujer casada se valía de ellos. Las parejas no esperan demasiado para divorciarse si el matrimonio no da frutos, según es costumbre de muchas culturas africanas.

¿Qué factores involuntarios explican ese índice elevado de esterilidad? Para determinarlos, los Caldwell revisaron datos etnográficos, demográficos e históricos. Las pruebas etnográficas evidenciaron que las regiones de baja fertilidad venían a coincidir con los límites de sociedades que no oponían barreras culturales a las relaciones sexuales prematrimoniales ni extramatrimoniales. En tales sociedades, la actividad sexual de la mujer comienza a los 10 años, o antes, y no se da mayor importancia a que las jóvenes lleguen vírgenes o no al matrimonio. Además, en muchas de esas sociedades suele ser habitual que la mujer se abstenga de la relación sexual los tres primeros años que siguen al parto de un hijo, lo que fomenta las relaciones extramatrimoniales del marido.

Los datos demográficos proceden de estudios efectuados en el norte del Zaire, a mediados de la década 1950-1960 y de la de 1970-1980. Las entrevistas mantenidas con ancianas permitieron reconstruir el registro de fertilidad de la zona desde finales del siglo pasado. Se concluye de ellas que la tasa de esterilidad era ya del 10 por ciento en 1880, había aumentado considerablemente hacia 1900, alcanzando un máximo poco después de la segunda guerra mundial; en el decenio de 1950, la infertilidad descendió entre las jóvenes, incrementándose de nuevo después de 1960.

De acuerdo con los datos históricos, la región de elevada esterilidad cubre la parte de Africa que más tardó en establecer contacto con el mundo exterior. Aunque las regiones costeras de Africa oriental y la sabana de Africa occidental habían recibido la visita, tiempo atrás, de comerciantes árabes y colonizadores europeos, el interior no se abrió hasta los años 1870. La zona de baja fertilidad queda prácticamente englobada por lo que fueran el Estado Libre del Congo y el Congo Francés, dos de las últimas naciones coloniales que se fundaron.

A partir de datos tan varios, los Caldwell elaboran el siguiente razonamiento: la colonización del Africa central se vio acompañada de la introducción de cepas de enfermedades venéreas hasta entonces desconocidas allí. Los habitantes de la costa y la sabana habían dispuesto de siglos para construirse una resistencia inmunológica frente a los patógenos extraños; no así los nativos del interior, que permanecieron vulnerables. La sífilis y la gonorrea se extendieron con especial rapidez entre las sociedades que no ponían obstáculos excesivos a las relaciones prematrimoniales ni extramatrimoniales. De no tratarse, la gonorrea puede provocar esterilidad. En esas sociedades, las jóvenes suelen mantener relaciones con los hombres de más edad, por lo que pueden quedar estériles antes de alcanzar la edad de matrimonio.

Una simple inyección de penicilina durante el curso de una infección gonorreica puede evitar la esterilidad. En los años 1940 y 50, las autoridades belgas administraron considerables cantidades de penicilina para combatir la frambesia (enfermedad infecciosa y contagiosa tropical similar a la sífilis) y las enfermedades venéreas. Consecuentemente, descendió el nivel de esterilidad entre las jóvenes, pero no entre las mujeres de más edad, puesto que el antibiótico no puede eliminar el efecto esterilizante de la gonorrea. Al interrumpirse las campañas sanitarias belgas por las rebeliones anticolonialistas y la guerra civil, en los años sesenta, el nivel de esterilidad subió nuevamente. La estabilización política permitió reemprender los programas de sanidad, observándose un descenso en la proporción de mujeres sin hijos. Con todo, las poblaciones del Africa central han

debido pagar por su contacto con el mundo exterior un alto precio en capacidad reproductora.

¿Hombre o ratón?

Desde que William Harvey publicara su tratado *Sobre el movimiento del corazón y la sangre en los animales*, en 1628, inaugurando con ello la moderna fisiología experimental, el estudio de animales de laboratorio ha constituido la base de la mayoría de los adelantos del conocimiento médico. En Occidente se sacrifican hoy anualmente millones de ratas y ratones y un número algo menor de conejos, perros, gatos y otros animales: para la preparación de vacunas, de nuevas técnicas quirúrgicas y de terapias medicamentosas; para estudios de nutrición; para el ensayo de posibles carcinógenos y para determinar la eficacia y seguridad de nuevos agentes farmacéuticos. La creciente movilización por la limitación, y hasta prohibición, del sacrificio de animales del laboratorio amenaza ahora todas esas actividades.

Surgen por doquier organizaciones opuestas a la experimentación animal. En muchas naciones y municipios se aprueban leyes que limitan la aportación de animales a los investigadores. El Congreso de los Estados Unidos tiene pendientes de resolución varios proyectos de ley que, de prosperar, acabarían, al decir de muchos, con la investigación. Grupos radicales de proteccionistas han invadido laboratorios para "liberar" ejemplares sometidos a investigación, en un caso perros que llevaban marcapasos experimentales y, en otro, ratas que se empleaban en un estudio del síndrome de Alzheimer.

La tendencia más significativa, sin embargo, no es el mero aumento de las acciones contrarias a la experimentación con animales, sino el cambio de las ideas subyacentes a esa postura. No se trata ya de preocuparse por el "bienestar" animal, sino que se aduce la existencia de "derechos animales". Todos los seres dotados de sentidos, se afirma, disfrutan de un derecho inalienable a la vida y a la protección frente al daño; no corresponde a los humanos decidir si cualquier otra especie puede someterse o no a experimentación, cualesquiera que pudieran ser los beneficios que reportara a los hombres; admitir la experimentación animal es propio de "especieístas", tan deleznables como los racistas o los sexistas.

Buen número de los grupos activistas admiten la existencia de esos derechos animales y están a favor de la completa abolición de la investigación con seres vivos. La mayoría de las sociedades humanitarias de protección animal a la vieja usanza permitirían cierta experimentación, pero con mayores restricciones y una supervisión más estrecha. Los "abolicionistas", en cambio, presionan cada vez más sobre los "restriccionistas", y su apoyo popular no es despreciable. En una encuesta realizada por *The Boston Globe*, sólo un tercio de los entrevistados que respondieron dieron un sí a la pregunta: "¿Cree que debe permitirse a los científicos que experimenten con animales?" En otra, publicada en la revista *Glamour*, el 59 por ciento de los que respondieron estarían dispuestos a utilizar un fármaco que no se hubiera ensayado en animales, aunque no se tuviera certeza de su inocuidad.

Los mismos proteccionistas moderados sostienen que muchos de los experimentos son innecesarios o repetitivos y denuncian el abuso frecuente de cobayos. Grupos que aceptan la investigación "biomédica" se oponen tenazmente a la investigación "conductual", que juzgan caprichosa y sin relación con las necesidades humanas. Sostienen la validez de métodos alternativos, en particular el desarrollo de modelos matemáticos o de ensayos con bacterias o cultivos de células humanas; alegan que algunos investigadores prefieren los estudios en animales por no molestarse en aprender métodos alternativos, o porque, en el fondo, son sádicos.

Los investigadores han respondido con lentitud al desafío, de igual manera a como los especialistas en evolución han tendido a ignorar las recusaciones de los creacionistas. Quienes trabajan en medicina ven tan meridiana la necesidad y el valor de la experimentación con animales que consideran innecesaria su defensa. La Sociedad Nacional de Investigaciones Médicas de los Estados Unidos, con sede en Washington, se fundó en 1946 para "asegurar la persistencia de facilidades para el progreso del estudio de enfermedades humanas y animales". Sus actividades se han ceñido, sobre todo, en la lucha contra de la legislación restrictiva y a la promoción de condiciones más adecuadas para la experimentación animal, así como al desarrollo de métodos "subsidiarios" para sustituir algunos estudios con animales. Se acaba de instituir la Fundación para la Investigación Biomédica, con sede en Waltham, Massachusetts, con el ánimo de emprender un amplio programa de educación pública sobre el valor y la necesidad de la investigación en animales.

Citan los investigadores una larga relación de avances en el conocimiento biológico básico y en la terapéutica médica de los que careceríamos de no ser por el estudio con animales. Afirman que se emplean en lo posible los ensayos in vitro, siquiera porque son más rápidos, más precisos y mucho más baratos, pero que ninguno puede sustituir en todos los casos a los ensayos practicados en animales vivos. Admiten que se han cometido abusos, pero insisten en que, con una dotación financiera adecuada, los investigadores responsables y sus instituciones se muestran deseosos de impedirlos, y que existen ya normas y mecanismos para su control.

El Acta de Bienestar Animal de 1966 recoge las condiciones que deben reunir los habitáculos y detalla los cuidados y trato que deben prestarse a los animales de laboratorio, excluidos los roedores. Cualquier laboratorio puede recibir la visita del Servicio de Inspección de Salud Animal y Vegetal (APHIS), del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, aunque sus agentes no puedan entorpecer el desarrollo de la investigación. Desde 1963, los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) dictan normas sobre cuidados y empleo de los animales de experimentación dirigidas a aquellos centros que disfrutan de su apoyo financiero. Esos centros deben asegurar su cumplimiento de las normas. Deben demostrar la certificación por parte de la Asociación Americana de Acreditación de Cuidado de los Animales de Laboratorio, o aportar un informe de su propio comité de cuidados de los animales donde se certifique el cumplimiento estricto de las normas o se señalen las deficiencias y se demuestre los avances realizados para remediarlas; los inspectores de los NIH efectúan comprobaciones puntuales para asegurar dicho cumplimiento.

Las estimaciones del número total de animales empleados en investigación y ensayos en los Estados Unidos muestran grandes discrepancias. La más fiable, contabilizada en 1978 por el Instituto de Recursos de Animales de Laboratorio, de la Academia Nacional de Ciencias, da una cifra de 20 millones de ejemplares, lo que supone un descenso del 40 por ciento respecto de 1968. Más del 95 por ciento son ratas, ratones y otros roedores; del 1 al 2 por ciento son perros o gatos y, menos del 1 por ciento, primates no humanos. Un 40 por ciento del total se emplea en investiga-

ción básica; un 8 por ciento en la enseñanza o cirugía experimental; el 26 por ciento en la demostración de los efectos benéficos de diversos productos; el 20 en el ensayo de los efectos nocivos de sustancias y, un 6, en otros fines.

Los ratones y ratas de laboratorio se obtienen de criadores con licencia; lo mismo ocurre con los primates y algunos gatos y perros. Otros gatos y perros proceden de depósitos públicos. Cada año se sacrifican en los depósitos públicos unos 15 millones de perros, según estimaciones de una sociedad de protección; no llegan a 400.000 los que se ceden a la investigación. Aún así, la "suelta de los depósitos" se ha convertido en el objetivo principal de muchos grupos protectores de animales, que prefieren el exterminio (por métodos humanitarios) de los ejemplares vagabundos no reclamados a su empleo en investigación. Respondiendo a esa oposición, el estado de Nueva York prohibió, en 1980, la venta de animales de depósitos a instituciones de investigación. Leyes similares se han aprobado recientemente en New Hampshire, Massachusetts y Maine. En Massachusetts quedará prohibida incluso la importación de animales de depósitos de otros estados a partir de 1986. La legislación californiana estudia actualmente dos leyes sobre la extracción de animales de los depósitos públicos; ambas han recibido ya la aprobación de una de las cámaras. Contempla una norma el fortalecimiento de los procedimientos que impidan el uso en investigación de todo animal calificado de doméstico; muchos investigadores la apoyan. La otra norma no sólo prohibiría la concesión de ejemplares de los depósitos, sino que consideraría ilegal someter a perros y gatos a un "dolor que provoque sufrimiento".

En el Congreso de los Estados Unidos, los proyectos de ley para renovar la autorización básica de los programas de los NIH exigen un estudio de 18 meses sobre la experimentación con animales que se practica en el país, a fin de determinar su nivel actual y el grado en que podría sustituirse con métodos alternativos. Las organizaciones de investigación biomédica alientan esta iniciativa. El proyecto del Congreso no se detendría en ese punto. Sería ley de obligado cumplimiento entre las normas del NIH y especificaría la composición de los comités institucionales de protección a los animales, que deberían contar con un miembro ajeno a la institución.

Una ley de rango más general, presentada por el senador Robert J. Dole (republicano por Kansas), pretende enmendar el Acta de Bienestar Animal. Convertiría las normas de los NIH en "condiciones mínimas" estrictas, de aplicación a cualquier instituto de investigación, y no sólo a las que reciben apoyo financiero de los NIH. Sometería los protocolos y procedimientos de investigación, actualmente exentos de la inspección por parte del APHIS, a una revisión para comprobar la satisfacción de las condiciones de bienestar animal.

Revisión de manchas

Poca cosa se sabe de las manchas solares. Se trata de zonas frías de la superficie del sol (están a unos 3900 grados Kelvin, mientras que la temperatura superficial media es de 5600 grados), lo que explica su oscuridad. Los intensos campos magnéticos que van asociados a las manchas probablemente sean la causa del enfriamiento, pues impiden la transferencia convectiva de calor desde el interior solar hacia la superficie. El número de manchas que se distinguen en el disco sigue un ciclo de 11 años, durante el cual la zona de generación de manchas se desplaza, desde latitudes de unos 35 grados, hacia el ecuador. A pesar de los años empeñados por los astrónomos para su desentrañamiento, seguimos sin conocer la razón del período, ni el origen de tan intenso magnetismo.

Robert Howard, de los observatorios de Monte Wilson y de Las Campanas, y Peter A. Gilman, del Observatorio de Gran Altitud de Boulder, Colorado, acaban de hacer público un dato nuevo y sorprendente que habrá de atravesar los cedazos teóricos. A partir de fotografías de luz blanca del astro tomadas en el Monte Wilson, Howard y Wilson midieron el desplazamiento de ciertas manchas en días consecutivos, y descubrieron que la velocidad de rotación del sol no era constante: aumentaba cerca del máximo y cerca del mínimo del ciclo solar, especialmente cerca del mínimo. A lo largo del intervalo de 62 años comprendido entre 1921 y 1982, el aumento de la velocidad de rotación ha sido, a veces, de hasta el 3 o 4 por ciento.

Ya en estudios anteriores se sugería cierta correlación entre la rotación y el ciclo de las manchas, pero en ellos se prestaba atención al avance de grupos de manchas, no a las manchas aisladas. Howard y Gilman creen que ese método es sesgado, porque el nacimiento y degeneración de las manchas del grupo puede alterar la posición media global del grupo, sin guardar relación con la rotación. Howard y Gilman han contado con los esfuerzos heroicos de su ayudante Pamela I. Gilman (no emparentada con Peter), quien se dedicó durante más de dos años a determinar la posición de cada mancha sobre 23.000 fotografías por medio de un cursor manual que le permitía registrar la posición en lenguaje digital inteligible para el ordenador. Un programa de ordenador dotado de un algoritmo de reconocimiento de patrones especiales entresacaba las manchas que aparecían en días sucesivos; de su desplazamiento se infería la rotación del sol.

Los investigadores compararon sus cálculos con los resultados que arrojaba un método distinto de determinar la rotación del sol: la espectroscopía Doppler. Con el movimiento de levante a poniente del sol, las líneas espectrales que emite el gas del extremo oriental, que se acerca a la tierra, se desplazan hacia la región azul del espectro; la luz que procede del extremo occidental, que se aleja de nosotros, se desplaza hacia el rojo. La cantidad de desplazamiento Doppler es proporcional a la velocidad de rotación. Las mediciones que por este sistema se vienen realizando en el Monte Wilson desde 1967 siguen un patrón similar al que ofrecen los datos sobre manchas solares: picos de máxima velocidad en 1971 (justo después de un máximo del ciclo solar), en 1974-76 (poco antes de un mínimo) y en 1979 (cerca de otro máximo).

La comparación de los dos grupos de datos corroboró una hipótesis muy difundida: la velocidad media de rotación de las manchas solares resulta un 3 por ciento superior a la de la superficie gaseosa del sol (determinada por espectroscopía Doppler). Según propone la teoría vigente, los campos magnéticos que originan las manchas solares no se hallan confinados en la superficie, sino que se "anclan" en niveles inferiores, en una capa de fluido más denso, más pesado. Esa capa se mueve más deprisa que la superficie solar, y arrastra consigo el campo magnético de las manchas solares, tan intensos que surcan el gas como un palo el agua. Bajo este enfoque, los máximos de velocidad de las manchas cerca de mínimos y máximos del ciclo solar reflejarían una aceleración de la capa de anclaje.

Sin embargo, los picos de los datos Doppler reflejan movimientos de aceleración de la superficie. Puesto que el momento angular total del sol debe mantenerse invariable, y puesto que no se ha visto deceleración sincrónica ninguna en la superficie, alguna zona inte-

rior del sol debe frenarse, probablemente por debajo de la que ancla las manchas solares. En efecto, debe transferirse momento angular del interior a la superficie. Howard y Gilman aventuran una hipótesis "muy especulativa" para explicar el mecanismo de transferencia. El momento angular se propagaría desde el interior hacia la superficie a modo de ondas lentas, acelerando primero la capa de anclaje de las manchas y luego la superficie, en la que se reflejarían las ondas de nuevo hacia el interior. La reflexión explicaría el retraso de la rotación de las manchas respecto de los cambios superficiales medidos por efecto Doppler de 1973 a 1982: quizás entonces se estuvieran reflejando en la superficie ondas de momento angular. La hipótesis ganará credibilidad si en un futuro los picos de la rotación de las manchas preceden a los Doppler, lo que correspondería a un período de propagación de las ondas desde el interior hacia la superficie.

La correlación que muestran el ciclo de las manchas y los cambios de la rotación del sol sugiere que ambos fenómenos se apoyan en una misma causa, pero largo se adivina el camino que habrán de recorrer los teóricos para establecer esa conexión. Algo se ha logrado al explicar que el ciclo solar es consecuencia de la rotación diferencial del sol: gira más rápido en el ecuador (su período es de 25 días) que cerca de los polos (donde es de 34 días). Según esos modelos, las líneas del campo magnético que van de norte a sur están inmersas en la zona convectiva, la capa subyacente a la superficie que se extiende hasta un cuarto de la distancia al centro, y de la que parte gas caliente hacia la superficie. Puesto que el sol gira más rápido en el ecuador, las líneas del campo se estiran en esa zona y se concentran en tubos de flujo magnético. Las manchas solares se forman allí donde afloran los tubos de flujo.

El problema que plantean estos modelos de la dinamo solar, según Gilman, es que no pretenden explicar por qué se genera en primer lugar la rotación diferencial, y que, de hecho, contradicen las teorías que sí lo hacen. El propio modelo de Gilman presenta el rápido giro del ecuador como una consecuencia de la circulación convectiva general, pero apenas reproduce el ciclo solar. Afirma Gilman que, desde hace una década, se ha planteado un conflicto entre las teorías que explican los fenómenos magnéticos solares y las que se centran en su dinámica; difícil resultará alcanzar ninguna resolución unificadora.

El tornado

Este intenso vórtice ha mostrado ser uno de los fenómenos más esquivos de la meteorología. Nuevas técnicas de observación están revelando cómo lo genera una tormenta

John T. Snow

Los tornados han 'estado, largo tiempo, rodeados de misterio. Resultan tanto más enigmáticos cuanto más importa su conocimiento. Atacan esporádica y violentamente, generando los vientos en superficie más fuertes que se conozcan y, en los Estados Unidos en particular, causan más muertes anuales que cualquier otro fenómeno meteorológico, si exceptuamos el rayo. Su comportamiento los hace inaccesibles a la observación planificada. Se cree así que la máxima velocidad del viento posible en un tornado supera los 400 kilómetros por hora, pero se trata de una mera estima basada en el análisis de películas y los daños sufridos por las estructuras. Sólo hay cálculos de las variaciones de la presión atmosférica, otro tipo crucial de información, de las contadas perturbaciones que, por casualidad, pasaron cerca de una estación meteorológica. Los meteorólogos han tenido, pues, que edificar sus a veces complicados modelos del comportamiento de esos fenómenos sobre unos cimientos observacionales precarios.

La situación está cambiando. Desde 1970, el radar Doppler ha permitido explorar las tormentas que producen tornados y se ha podido medir las velocidades del viento en el interior de las mismas desde una distancia de seguridad. Lo que ha supuesto un mejor conocimiento de la corriente ascendente, columna de aire que se eleva en el interior de la tormenta, y de su modo de interacción con el entorno. A su vez, esto ha conducido a un cuadro mucho más claro de cómo un fuerte chorro ascendente comienza a girar y cómo los vientos en espiral se intensifican hasta el punto de desencadenar un tornado.

Más costosa de alcanzar se muestra la pretensión de descifrar la dinámica del tornado. El diámetro del embudo rara vez supera algunos centenares de metros, ni la resolución del radar Doppler es suficientemente alta para proporcionar velocidades del viento a una escala tan pequeña. Aunque el análisis de películas ofrece muchas pistas acerca del movimiento del aire en el embudo, las descripciones teóricas de los campos de viento y de presión en el interior del tornado siguen apoyándose, principalmente, en simulaciones de laboratorio o de ordenador. Pero ya se divisan en el horizonte otras técnicas de medición, así el lidar (que funciona basándose en el mismo principio que el radar, si bien usando luz en lugar de microondas), que prometen abrir el interior a la observación sistemática y revelar parte del misterio que todavía envuelve al tornado.

¿Qué es un tornado?

Un producto de la tormenta, específicamente de la interacción de una tormenta intensa con vientos en la troposfera (capa activa de la atmósfera que se extiende desde el suelo hasta una altura de 9 a 17 kilómetros). En el proceso mediante el cual se forma un tornado, una pequeña fracción de la tremenda energía de la tormenta, cuya nube cumulonimbo puede tener diámetros de 10 a 20 kilómetros y más de 17 de altura, se concentra en una zona que no suele extender su diámetro más allá de escasos centenares de metros. Antes de abordar los pormenores del proceso, describiremos el fenómeno en sí mismo.

El tornado es un vórtice: el aire gira alrededor de su eje con la misma velocidad aproximada con que se mueve en la dirección y a lo largo de dicho eje. Aspirado por la fuerte reducción de la presión atmosférica en su núcleo central, el aire penetra hacia la base del vórtice, procedente desde todas las direcciones, a través de una capa delgada cuyo espesor viene a ser de unas decenas de metros en la proximidad del suelo. En la base, el aire comienza a girar bruscamente, describiendo hélices alrededor del núcleo en un movimiento ascendente y, finalmente, en la oculta porción superior del tornado, se incorpora a la corriente de aire de la nube madre. La presión dentro del núcleo puede haber disminuido en un 10 por ciento con respecto a la que ejerce la atmósfera circundante, es decir, aproximadamente la misma diferencia que existe entre la presión sobre el nivel del mar y a una altitud de un kilómetro. Los vientos del tornado son casi siempre ciclónicos, lo que en el hemisferio Norte significa de giro antihorario.

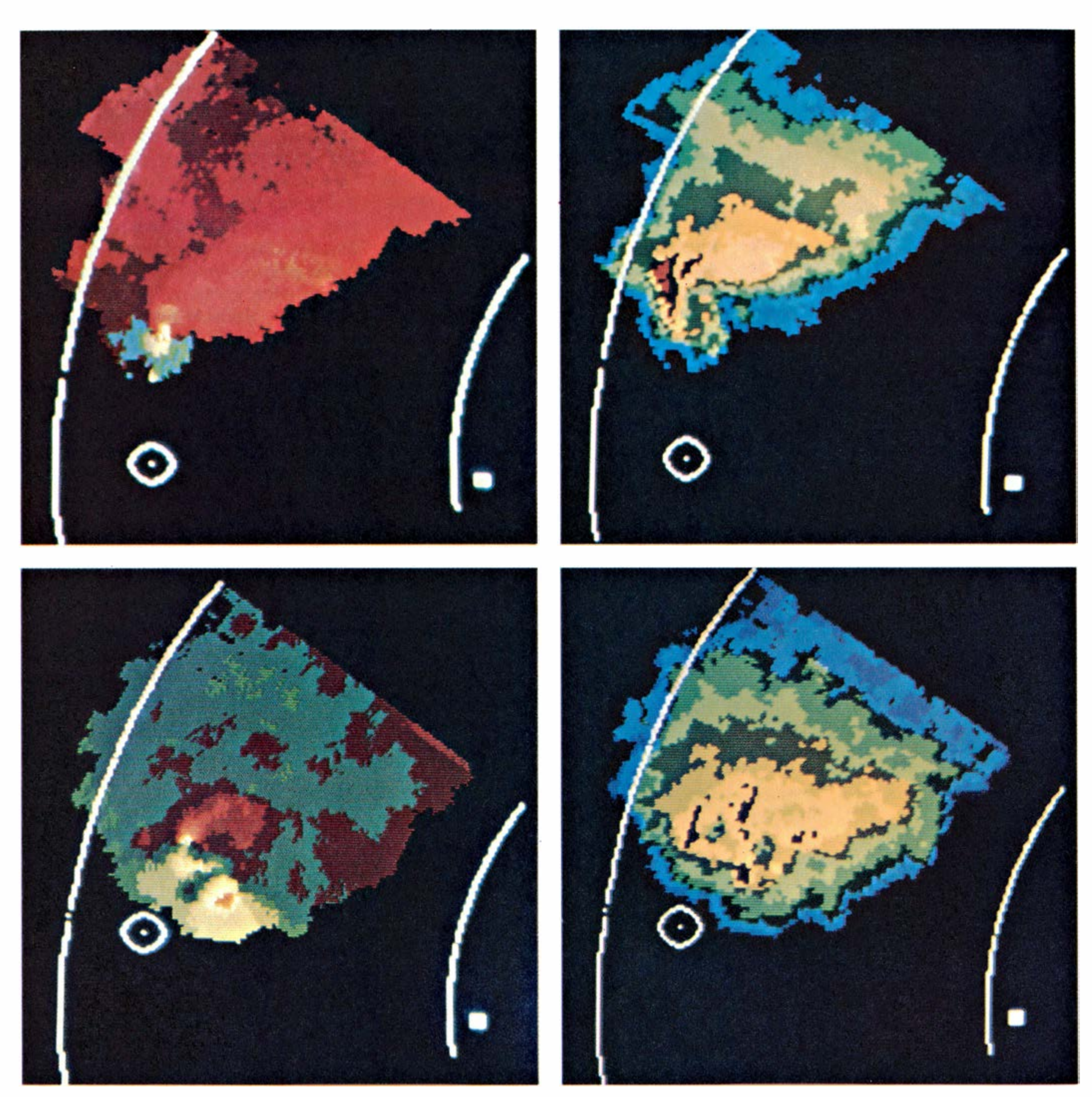
Frecuentemente, aunque no siempre, el vórtice se nos aparece cual nube en embudo que cuelga desde la tormenta originante, que llega en parte, o en todo, hasta el suelo. La nube en forma de embudo se crea sólo si la disminución de presión en el núcleo excede cierto valor crítico, que depende de la temperatura y humedad del aire entrante. A medida que el aire penetra hacia el área de baja presión, se expande y se enfría; y si se enfría lo necesario, el vapor de agua que contiene se condensa y forma gotículas. Cuanto más cálido y seco sea el aire que penetra, tanto mayor habrá de ser la caída de presión para que se produzca la condensación y se origine la nube. A veces no se forma embudo de condensación; en cuyo caso, el tornado se manifestará a través del polvo y restos que transporte hacia arriba.

Los embudos miden desde decenas de metros hasta varios kilómetros de longitud; allí donde se unen a la nube madre, el diámetro alcanza una longitud variable: de escasos metros a centenares de ellos. Suelen adquirir forma cónica; pero hay tornados, muy intensos, que dibujan columnas cilíndricas, cortas y anchas. Y abundan también los tubos largos en forma de cuerda, arrastrados horizontalmente. Durante la breve vida de un tornado (nunca se prolonga más allá de algunas horas), el tamaño y la forma del embudo cambian

notablemente; reflejan variaciones de la intensidad del viento o de las propiedades del aire entrante. Su color va desde un blanco sucio hasta gris o gris azulado cuando lo integran principalmente gotículas de agua; si el núcleo se llena de polvo, el embudo puede adquirir un matiz más exótico, tal como el rojo de la arcilla de Oklahoma occidental. El estruendo caracteriza también a muchos tornados, que producen el estrépito de un tren de mercancías o un motor a reacción, ruido que quizá se deba a la interacción entre el núcleo concentrado de fuertes vientos y el suelo.

Los tornados se forman en las corrientes ascendentes de las tormentas. Estas, a su vez, se producen en una masa de aire inestable: aquella en que una partícula de aire, forzada ligeramente a elevarse, prosigue en aceleración ascendente.

En la atmósfera, la presión siempre decrece al aumentar la altura, pauta que suele repetir la temperatura. Toda partícula o burbuja de aire obligada a



1. TORBELLINO DE VIENTOS DE UN MESOCICLON: aparece con toda claridad en el radar Doppler (*izquierda*), pero no en el radar corriente (*derecha*). Se llama mesociclón a la corriente ascendente en una tormenta que puede dar lugar a un tornado. Las imágenes son cortes horizontales a alturas de 600 metros (*arriba*) y 7600 (*abajo*) de una tormenta tornádica que atacó Binger, en el estado de Oklahoma, el 22 de mayo de 1981. El radar corriente mide la intensidad de las precipitaciones a partir de la intensidad del eco de la tormenta; las zonas de menor intensidad son azules, las de mayor intensidad rojas. La presencia del mesociclón queda indicada por la forma de gancho en la imagen superior, resultado de la lluvia arrastrada por los vientos en rotación. El radar Doppler mide la dirección y la velocidad del viento a partir del corrimiento de frecuencia entre el eco y el haz transmitido; el rojo simboliza vientos que se alejan del radar, el verde vientos hacia el radar y, el azul, vientos perpendiculares al haz. Los colores claros indican vientos fuertes. El mesociclón deja un inconfundible "sello": zonas adyacentes rojas y verdes, lo que revela un cambio de dirección del viento de 180 grados en una distancia corta. Este sello se veía hasta una altura de 12 kilómetros en la tormenta de Binger, que originó un tornado de extremada violencia. Las imágenes se elaboraron en el Laboratorio Nacional de Tormentas Intensas de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) en Norman, Oklahoma.

elevarse se enfría a medida que se expande en respuesta a la disminución de la presión. Ahora bien, con una estratificación atmosférica inestable, la temperatura en el aire en reposo disminuye con la altura más rápidamente que en la partícula ascendente, con el resultado de que la partícula puede quedar más caliente, y por tanto menos densa, que su nuevo aire circundante. Comienza entonces a ascender libremente. Este movimiento ascendente, llamado convección libre, es un proceso que libera energía: la energía potencial almacenada en una atmósfera con estratificación inestable se convierte en energía cinética del movimiento.

Tormentas

En realidad, es raro que la temperatura de la atmósfera decrezca más deprisa que el ritmo al que se enfría el aire seco cuando asciende. Pero el aire suele hallarse húmedo en la proximidad del suelo; y cuando se le obliga a elevarse, se enfría hasta su punto de rocío (en el "nivel de condensación por elevación", o NCE); el vapor de agua en el aire comienza a condensarse. La condensación libera el calor latente que se añadió al agua cuando se evaporó. Resulta de ello una notable disminución del ritmo de enfriamiento en la partícula ascendente. Generalmente, si se fuerza a la partícula sólo una pequeña distancia por encima del NCE, alcanzará un nivel donde queda más caliente que el aire que la rodea (el "nivel de convección libre", o NCL). Ascenderá entonces libremente hasta que su temperatura vuelva a estar en equilibrio con la temperatura ambiente. Este nivel de equilibrio define la cima de la nube; la base plana de la nube pretormentosa está en el NCE.

Cuando la atmósfera está constituida por una capa de aire cálido y húmedo cercana a la superficie, sobre la cual hay aire cálido y seco, presenta típicamente otra clase de inestabilidad. Con frecuencia, las dos capas están separadas por una "inversión", es decir, una delgada capa de aire donde la temperatura aumenta con la altura. Una partícula de aire que ascienda en el seno de una inversión quedará más fría que el aire que la rodea, y tenderá a descender de nuevo. Una inversión es, pues, una capa muy estable: tiende a anular el movimiento vertical y a frenar el desarrollo de la inestabilidad. A medida que progresa el día y el Sol calienta el suelo, el aire subyacente a tal inversión se calienta todavía más y, en virtud de la evaporación, puede adquirir mayor humedad. Si la inversión se erosiona localmente por mezcla desde abajo, o si efectos a gran escala elevan la inversión en bloque, la ahora altamente inestable capa superficial hace erupción explosiva en varios puntos. El aire de la superficie confluye horizontalmente hacia esos puntos de erupción, formando espesas nubes tormentosas.

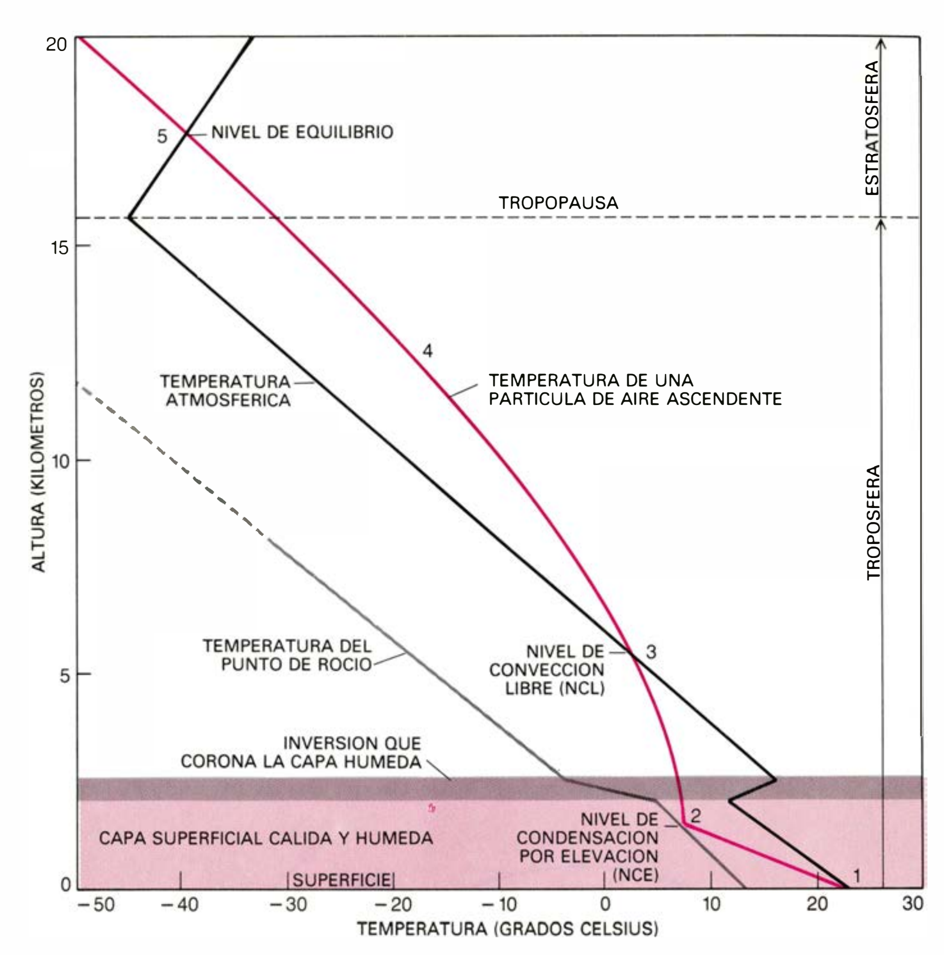
Un proceso que puede debilitar o disipar por completo una inversión local es el paso, por su vertical, de un máximo de la corriente en chorro, río de fuertes vientos que corre de Oeste a Este a una altitud de ocho a 12 kilómetros. La corriente en chorro sobre los Estados Unidos suele ir asociada con el frente polar, o frontera entre las masas de aire polar y tropical; se mueve hacia el Norte y hacia el Sur con el frente según la estación del año. El eje del chorro tiene una anchura de unos 100 kilómetros (en la dirección Norte-Sur) y un kilómetro de espesor. Las velocidades del viento en el chorro varían entre 70 km/h y un máximo estimado de unos 300 km/h. (Aunque los científi-



2. TORNADO EN EL SURESTE DE KANSAS, que se produjo poco después de las siete de la tarde del 30 de junio de 1974. La fotografía recoge el comienzo de su desarrollo, débil todavía, y cuando su nube en embudo era larga y delgada; al aumentar de intensidad, el embudo se ensanchó. Este fue el segundo de dos tornados producidos por la misma tormenta, cada uno de los cuales duró unos 20 minutos. David Hoadley tomó la foto desde 18 kilómetros.

cos que estudian la atmósfera expresan las velocidades del viento en metros por segundo, usamos aquí kilómetros por hora porque es una unidad más conocida para el lector.) Dentro del chorro hay "paquetes" de vientos de particular intensidad que miden varios cientos de kilómetros de longitud y se mueven corriente abajo empujando el aire que se les opone y aspirando el que dejan detrás. La corriente ascendente regional que se produce detrás de un máximo de viento puede disipar una inversión, provocando la formación de tormentas, o puede intensificar tormentas en fase de desarrollo. Cuando una tormenta engendra un tornado, casi siempre está presente este tipo de "apoyo favorable del aire superior".

Mas, con ese apoyo incluido, sólo se desarrollará una corriente ascendente en el caso de que se ayude, al aire inestable de la vecindad del suelo, a elevarse hasta el nivel de convección libre. El ascenso mecánico requerido toma varias formas; un buen ejemplo lo tenemos en el aire obligado a remontar una pendiente por un sistema bárico importante. Otro tipo de ascenso ocurre en un frente frío, donde el aire frío y denso avanza sobre una región con aire más cálido, penetrando por debajo de él y obligándolo a ascender.



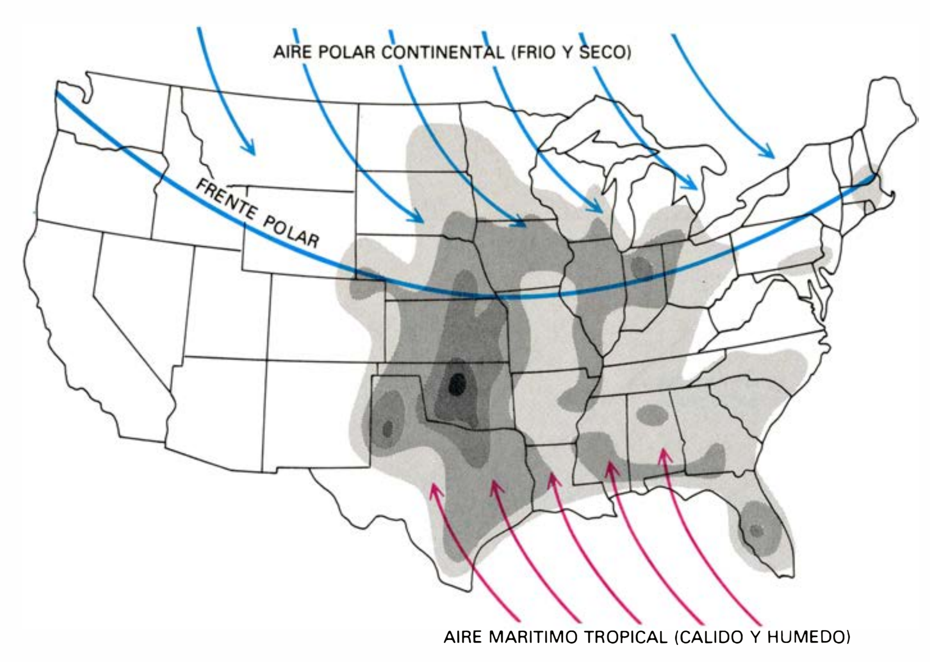
3. SE FORMAN CORRIENTES ASCENDENTES DE LA TORMENTA cuando la temperatura de la atmósfera disminuye rápidamente con la altura. Una partícula de aire caliente y húmedo (*1*), obligada a ascender desde la superficie, se enfriará al principio más rápidamente que la atmósfera circundante. Su ritmo de enfriamiento decrece notablemente, una vez que su temperatura ha igualado la del punto de rocío en el "nivel de condensación por elevación", o NCE (*2*), porque la condensación del agua comienza a liberar calor latente. Si la partícula se ve obligada a elevarse por encima del NCE, alcanzará el "nivel de convección libre", NCL (*3*), por encima del cual está más caliente que su entorno. A partir de entonces, ascenderá libremente (*4*), hasta que de nuevo quede en equilibrio con el aire que la rodea (*5*). En una tormenta intensa, la corriente ascendente sobrepasa el nivel de equilibrio en la cima de la nube.

¿Por qué en el Medio Oeste?

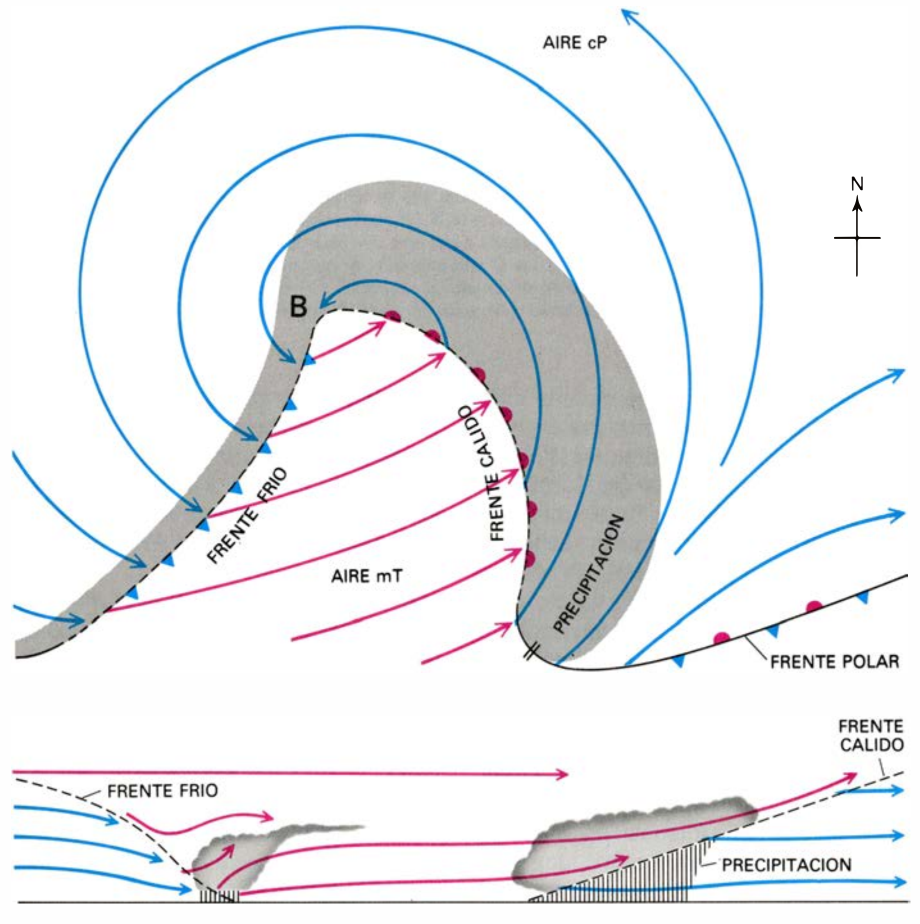
Todos los estados de la Unión han conocido el azote de los tornados, experiencia que han sufrido otros lugares del mundo. Australia parece ocupar el segundo puesto en la frecuencia de este fenómeno, aunque resulta difícil hacer comparaciones exactas porque las estadísticas para lugares escasamente poblados (como este país) pueden no ser fidedignas. De cualquier modo, nadie discute que el horno de mayor producción mundial de tornados se halla en la parte central y suroriental de los Estados Unidos, con el área de máxima frecuencia en el norte de Texas, Oklahoma, Kansas y partes de Nebraska y Missouri. En primavera y, en menor grado, en verano, cuantos ingredientes se necesitan para la formación de tormentas intensas generadoras de tornados los ofrece esta región: una distribución de temperatura y humedad en la atmósfera altamente inestable, intensos frentes fríos que suministran el ascenso necesario para iniciar la convección y vientos en la atmósfera superior favorables para la formación de fuertes corrientes ascendentes.

Lo más probable es que estas condiciones se den simultáneamente a lo largo del frente polar, frontera entre la masa de aire polar continental (Pc) y la de aire marítimo tropical (mT), más cálida y húmeda. El aire Pc se enfría en las largas noches invernales sobre el Canadá central y occidental; las Montañas Rocosas canalizan su avance hacia el Sur, Sureste y Este. El movimiento hacia el Norte del aire mT del golfo de México se ve favorecido por el flujo en sentido horario alrededor de una célula de alta presión centrada al este de las Bermudas. En virtud de lo cual, el encuentro de las dos masas de aire se produce con suma violencia en la parte central de los Estados Unidos, donde el contraste Norte-Sur de temperatura, a nivel del mar, es muy marcado, sobre todo en primavera. Por decrecer la presión atmosférica con la altura antes en el aire frío que en el caliente, el contraste de temperatura va normalmente acompañado de un gradiente de presión en altura, que origina una fuerte corriente en chorro que sopla paralelamente al frente polar. Los vientos intensificados en la alta atmósfera crean condiciones regionales que favorecen el movimiento vertical y la formación de tormentas.

Si se produce una ligera perturbación en el frente polar, por ejemplo a causa de una pequeña variación en la trayectoria de la corriente en chorro, el aire caliente y húmedo comenzará a empujarlo abombándolo en dirección Norte, al Este del centro de la perturbación, mientras que, al Oeste del centro de la perturbación, el aire frío comenzará a deslizarse hacia el Sur. Los vientos resultantes originan una circulación ciclónica (antihoraria) alrededor de un centro de baja presión situado en el vértice de la perturbación en forma de ondas. Tales "ondas ciclónicas", que se extienden de 1000 a 2000 kilómetros en dirección Oeste a Este, avanzan



4. FRECUENCIA DE TORNADOS, máxima en la parte central de los Estados Unidos, donde las masas de aire polar continental, canalizadas hacia el SE por las Montañas Rocosas, se encuentran con el aire marítimo tropical que avanza hacia el Norte desde el golfo de México. En primavera, el contraste de temperatura al atravesar este frente polar es muy conspicuo, creando condiciones atmosféricas de estratificación potencialmente inestable que favorecen la formación de tormentas intensas. El sombreado más oscuro de la ilustración representa las regiones donde concurre máxima frecuencia de tornados.



5. ONDA CICLONICA, perturbación en el frente polar que se mueve hacia el Este y favorece la formación de tormentas tornádicas, representada en planta y corte vertical. El aire marítimo tropical avanza hacia el Nordeste, mientras que el aire frío lo hace hacia el Sur, creando una circulación antihoraria alrededor de un centro de baja presión en el vértice de la onda. La onda tiene de 1000 a 2000 kilómetros de anchura en la dirección Este-Oeste. Su borde anterior es el frente cálido, donde el aire caliente asciende gradualmente sobre el más frío, formando nubes estratiformes. El borde posterior, o frente frío, es más empinado y se mueve más deprisa que el frente cálido. Obliga a elevarse bruscamente al aire cálido.

hacia el Este en la línea del frente; los vientos del Sur de sus cuadrantes surorientales ayudan a atraer el aire mT hacia el Norte. A medida que el aire mT, caliente y húmedo, se dirige hacia la parte central de los Estados Unidos, por la mitad inferior de la troposfera, corre bajo aire mucho más seco y frío. La distribución de la temperatura atmosférica resultante es fuertemente inestable. En el borde posterior de la onda ciclónica, el frente frío que avanza con rapidez penetra bajo el cálido aire mT, induciendo el empujón hacia arriba necesario para iniciar la convección. A lo largo de este frente frío suelen formarse las tormentas fuertes.

La región favorable para la producción de intensas tormentas en la parte central de los Estados Unidos se mueve siguiendo un ciclo estacional, comenzando cerca de la costa del Golfo a fines de febrero, cuando la masa de aire Pc ha alcanzado el límite de su progresión hacia el Sur. El "nido" de las tormentas avanza gradualmente hacia el Norte; atraviesa las llanuras a medida que transcurre la primavera, el suelo se calienta y el aire del Golfo empuja hacia atrás la masa de aire polar. A principios de verano, las tormentas están ya sobre ambas Dakotas. Desde finales de verano hasta principios de otoño, se asiste a una época relativamente tranquila porque el contraste de temperaturas al atravesar el frente es débil. En las postrimerías del otoño, el contraste se intensifica de nuevo y la región de producción de tormentas se retira hacia el Golfo, cerrando el ciclo. La retirada es algo más rápida que el avance hacia el Norte, por cuya razón el período de condiciones favorables para la producción de tormentas dura menos en otoño que en primavera.

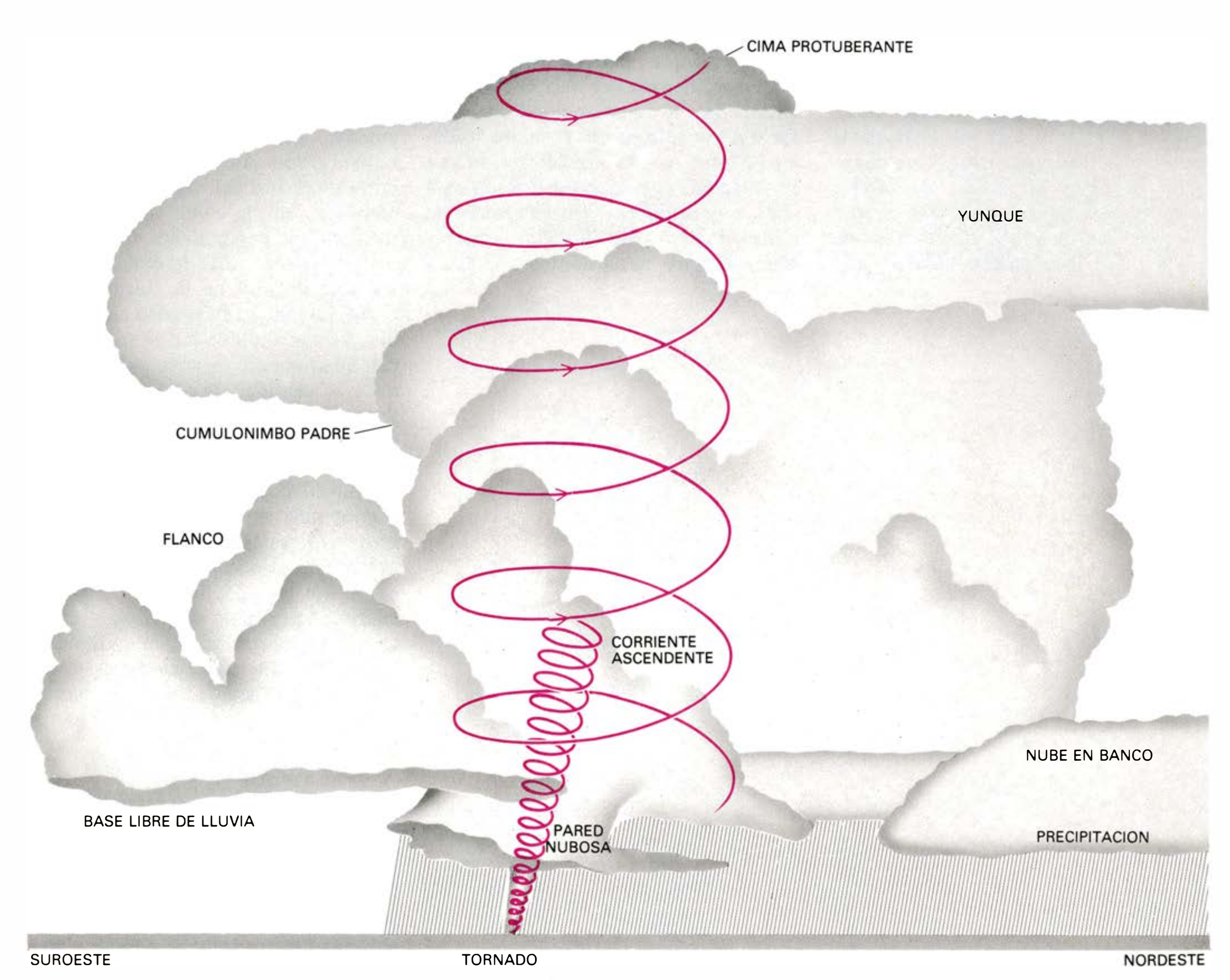
En líneas generales, la distribución mensual de tornados sigue la misma norma. Alrededor del 74 por ciento de cuantos se registran en los Estados Unidos se desarrollan entre marzo y julio, con el máximo en los meses de abril (15 por ciento), mayo (22 por ciento) y junio (20 por ciento). Los tornados de abril son los que causan una mayor mortandad. Por ser máximo el contraste entre las dos masas de aire desde fines de marzo y todo abril, muchas tormentas intensas y la mayoría de los tornados violentos se producen en este período. En la frecuencia de estos fenómenos hay un máximo secundario, más débil, en octubre y noviembre; refleja la producción de tornados por tormentas que acompañan a los huracanes y por tormentas del frente polar.

Una tormenta intensa proporciona la corriente ascendente, persistente y concentrada, que se necesita para iniciar un tornado y evitar que su núcleo de baja presión se rellene desde arriba. Vista desde el satélite, la cima de la tormenta presenta una sucesión peculiar de "burbujas" ascendentes de materia nubosa que sobrepasan la cima media de la nube en dos o cuatro kilómetros, para volver luego a descender, reincorporándose a la masa nubosa. Las burbujas delatan una fuerte corriente ascendente, con un alto grado de organización en la tormenta. Mas, para que se forme un tornado, el aire de la corriente ascendente debe entrar además en rotación. Lo que sucederá si la corriente ascendente concentra la vorticidad contenida en los vientos horizontales de la troposfera.

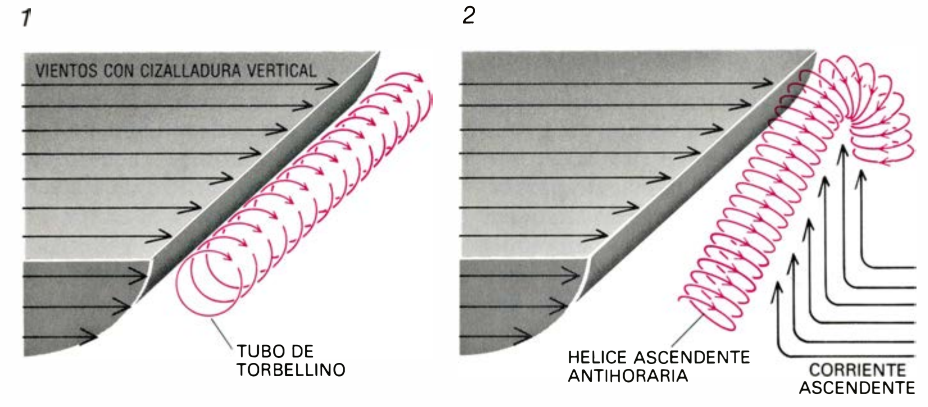
No todos los vientos sirven para ello. Parece que han de presentar una fuerte cizalladura vertical en magnitud y en dirección: la velocidad del viento crecerá con la altura y la dirección debe rolar de Sureste a Oeste. La cizalladura vertical en la velocidad del viento proporciona una fuente de rotación alrededor de un eje horizontal. Para comprender la razón, imagínese una rueda de paletas situada en el campo de viento, con viento incidente desde la izquierda. Puesto que el viento que incide sobre la parte superior de la paleta es más fuerte que el que lo hace sobre la inferior, la rueda comenzará a girar en sentido horario. De manera semejante, una partícula de aire en el seno de una corriente de viento con cizalladura adquirirá una componente rotacional de movimiento, por el sencillo motivo de que la cima de la partícula se mueve a una velocidad mayor que su parte inferior. Cuando el viento interactúa con una intensa corriente ascendente, la rotación alrededor del eje horizontal puede "inclinarse" o "verticalizarse", convirtiéndose en rotación en torno a un eje vertical. La cizalladura en la dirección del viento, a diferencia de la velocidad, constituye una fuente más directa de rotación vertical; los vientos cuya dirección varía del Sureste al Oeste favorecen un giro ciclónico (antihorario) en el aire que converge en la parte inferior de la corriente ascendente.

Formación de un tornado

De acuerdo con los modelos actuales, las tormentas intensas cumplen dos fases en la formación de los tornados.



6. ANATOMIA DE UNA TORMENTA TORNADICA, donde se revelan sus principales características. Avanza hacia el Nordeste; el influjo de aire tiene lugar sobre todo hacia su flanco meridional. El aire cálido e inestable asciende sobre el aire frío que sale de la tormenta para formar la línea de turbonada, que se fusiona con la nube cumulonimbo madre. La parte de la base libre de lluvia, del borde posterior, está a la altura del nivel de condensación; la parte plana de la cima de la nube se encuentra en el nivel de equilibrio. Como la corriente ascendente es fuerte, el aire sobrepasa el nivel de equilibrio antes de caer de nuevo en el "yunque". El extremo inferior del mesociclón giratorio es la pared de nubes. El banco de nubes marca la posición del frente de turbonada, donde una corriente descendente fría, ocasionada por la precipitación, penetra por debajo del aire caliente situado delante de la tormenta.



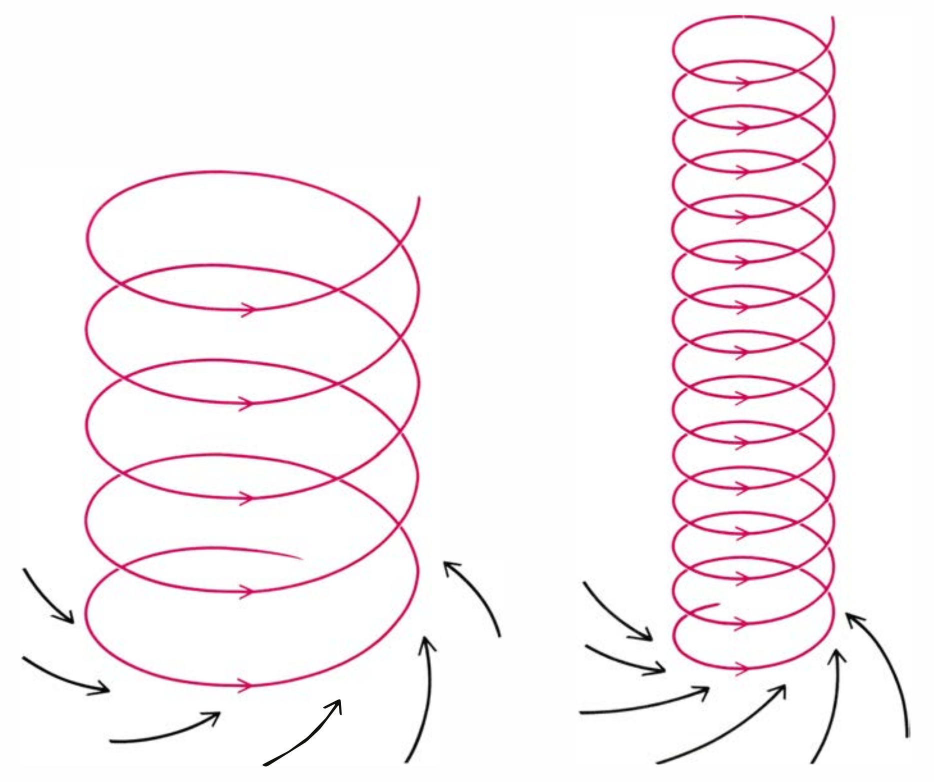
7. CONVERSION del giro horizontal en giro vertical lo que, de acuerdo con las teorías actuales, inicia la rotación de la corriente ascendente de una tormenta. El giro alrededor del eje horizontal, ilustrado por el tubo de torbellino, existe siempre que la velocidad del viento aumenta con la altura (*1*), porque la parte superior de una partícula de aire dada se mueve más deprisa que su parte inferior. Cuando los vientos con cizalladura vertical los desvía una intensa corriente ascendente (*2*), el eje de rotación se eleva hacia la vertical. El flujo hacia arriba que resulta presenta giro antihorario; la parte posterior del tubo, con giro horario, queda generalmente en la corriente descendente, acompañada de precipitación de la tormenta.

Primera: la corriente ascendente de la tormenta comienza a girar entera; la columna en rotación de aire ascendente, de 10 a 20 kilómetros de diámetro, se llama mesociclón. (Si prosigue hasta llegar a generar un tornado, cosa que la mayoría de los mesociclones no consiguen, tenemos un ciclón tornádico.) Las observaciones mediante radar Doppler han mostrado que la rotación comienza en la troposfera media, a altitudes de cuatro a ocho kilómetros. La verticalización parece ser el principal mecanismo que opera en esta fase.

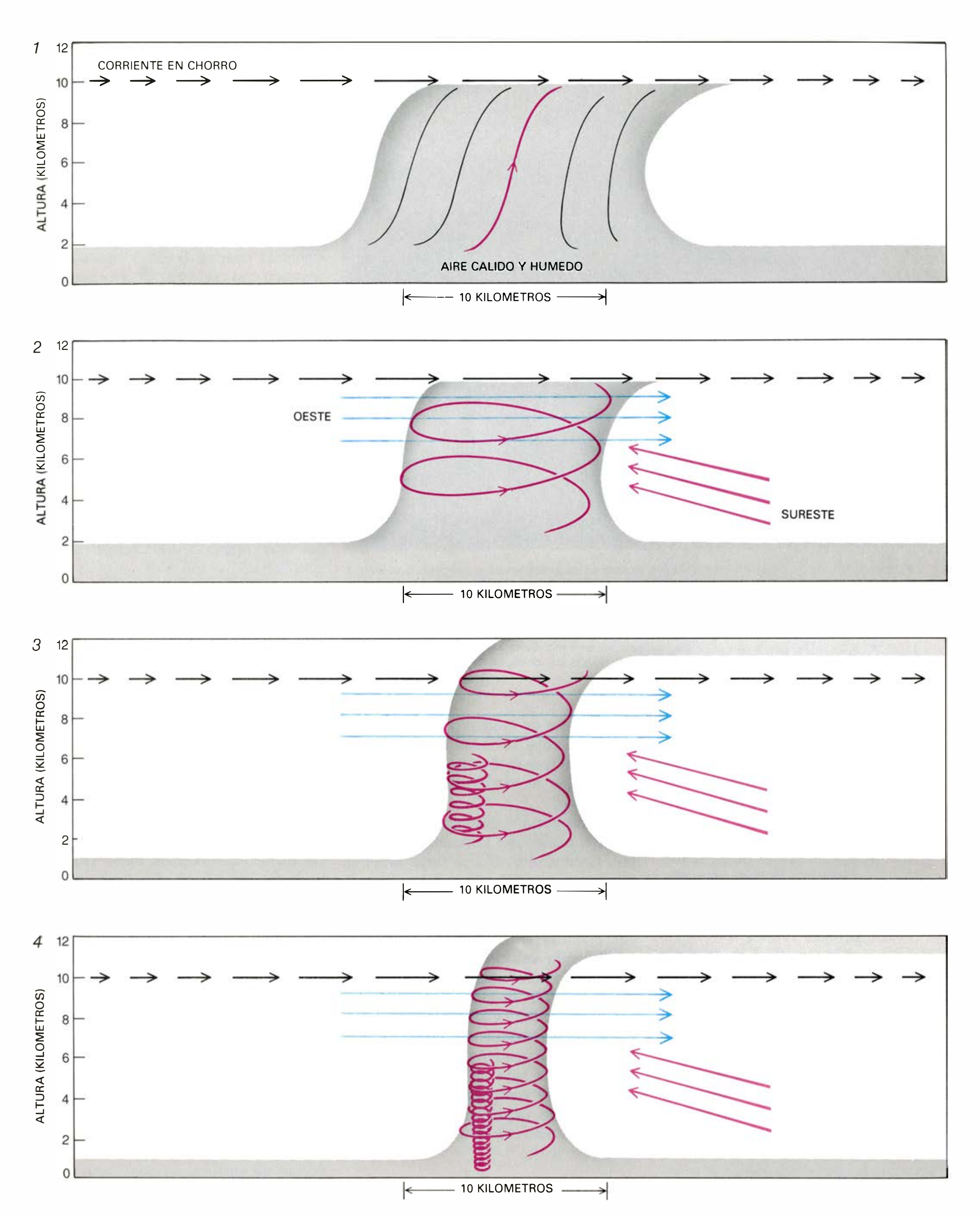
Una vez llegada la rotación a su nivel intermedio, se va extendiendo hacia el suelo por medio de un efecto de "tubería dinámica". A lo largo de la columna en rotación, el campo de presión está ahora en equilibrio con el campo de viento, fuertemente curvado: la fuerza bárica dirigida hacia dentro que actúa sobre las partículas de aire como resultado de la baja presión existente en el centro de la columna queda contrarrestada por la fuerza centrífuga, dirigida hacia fuera, de las partículas alrededor del centro; esta última fuerza es consecuencia de la rotación. En tales condiciones, llamadas de ajuste ciclostrófico, el aire se mueve fácilmente alrededor y a lo largo del eje del ciclón, pero los movimientos radiales (hacia el eje o alejándose de él) están fuertemente entorpecidos. Mientras que antes penetraba algo de aire en la columna ascendente a niveles intermedios, ahora casi todo el aire que fluye a lo largo del eje del ciclón ha sido absorbido desde la parte de abajo. El ciclón actúa de tubería dinámica; se parece bastante a la manguera de un aspirador doméstico, si exceptuamos la pared de la manguera, está ahora constreñido por su propio movimiento de rotación y no lo canaliza el flujo del ciclón.

De ello resulta una intensificación de la corriente ascendente y, por consiguiente, de los vientos convergentes bajo el ciclón. A causa de la cizalladura en la dirección del viento, el aire que converge en la columna ascendente tiene ya una componente de giro alrededor del centro de la columna. Una ley fundamental de la física exige la conservación del momento cinético de una partícula alrededor de su eje vertical. Su momento cinético es proporcional a su cantidad de movimiento (producto de la masa por la velocidad) y a su distancia al eje. A medida que la distancia de la partícula al centro decrece, su velocidad debe aumentar; comienza a girar más velozmente alrededor del centro, de manera análoga a como la patinadora gira más deprisa alrededor de su eje cuando junta sus brazos al cuerpo. La tubería dinámica intensifica, pues, la rotación en su extremo inferior, lo que a su vez alarga la tubería hacia abajo a medida que la fuerza centrífuga crece lo suficiente para que se alcance el ajuste ciclostrófico.

En su convergencia hacia la base de la manguera, las partículas de aire giran y se aceleran hacia arriba. Al hacerlo, se "estiran" verticalmente. El alargamiento reduce el diámetro del mesociclón hasta alrededor de dos a seis kilómetros, lo que aumenta todavía más la velocidad de los vientos, porque el momento cinético del aire, que ahora gira a menor distancia, debe conservarse. La verticalización, el efecto de tubería dinámica, la convergencia y el alargamiento vertical, procesos cada uno de los cuales acelera a los demás, pueden con el tiempo formar un mesociclón



8. CONVERGENCIA Y ALARGAMIENTO son dos factores que intensifican el giro antihorario iniciado al inclinarse el tubo de torbellino y lo extienden hacia arriba. La columna ascendente en rotación en la troposfera media acelera los vientos que convergen hacia su extremo inferior, porque la fuerza centrífuga anula el flujo que atraviesa las paredes de la columna (el efecto de "tubería dinámica"). La cizalladura en la dirección de los vientos convergentes imparte a la corriente que penetra una rotación alrededor del eje vertical; la rotación va progresando en descenso hacia el suelo. Al mismo tiempo, la convergencia, reforzada, comprime la columna y la estira hacia arriba. Al adelgazarse, la columna gira más deprisa.



9. FASES DE LA FORMACION DE UN TORNADO. La inestabilidad hidrostática genera una fuerte corriente ascendente, intensificada además al coincidir con un máximo de la corriente en chorro (*1*). La corriente ascendente, al interactuar con vientos que tienen cizalladura vertical tanto en dirección como en velocidad (*2*), comienza a girar en la troposfera media y forma un mesociclón. Este se estrecha e intensifica a medida que se extiende hacia el suelo y es estirado hacia arriba (*3*). Mientras tanto, el naciente tornado, pequeña zona donde se favorece la convergencia, se ha formado dentro del ciclón. Conforme se intensifica el ciclón, los mismos procesos que lo originaron (inclinación, efecto de tubería dinámica, convergencia y alargamiento) constituyen el núcleo del tornado. A diferencia de la que presenta el ciclón, la rotación del tornado basta para hacer que el primero se extienda hasta el suelo. A medida que el vórtice se acerca al suelo, se asiste a una rápida caída de presión atmosférica en la superficie y un aumento en la velocidad del viento.



10. ESTRUCTURA DE VORTICES MULTIPLES, característica de los tornados violentos. Este mató a una persona cuando de abatió sobre Friendship, Oklahoma, el 11 de mayo de 1982. Aunque la fotografía recoge sólo tres vórtices subsidiarios visibles, se observaron por lo menos cuatro. Los "cazadores de tormentas" siguieron al tornado durante dos horas, en las cuales pasó varias veces de estructura de vórtices múltiples a la de vórtice único, y viceversa. El tornado padre, visible como una nube en forma de taza que rodea a los vórtices subsidiarios, tenía un diámetro aproximado de un kilómetro. La fotografía fue tomada por Howard B. Bluestein, de la Universidad de Oklahoma, desde dos kilómetros de distancia.

que se extienda desde un kilómetro sobre el suelo hasta casi la cima de la tormenta, a unos 15 kilómetros de altura. Vientos en superficie con velocidades superiores a 100 kilómetros por hora pueden soplar en toda la amplia región por debajo de la columna giratoria. Sin embargo, la rotación en el mesociclón se mantiene todavía demasiado difusa y comienza a una altura excesiva para generar vientos en superficie que sean realmente fuertes.

La generación de tales vientos llega con la segunda fase, en que una tormenta intensa da lugar a un tornado: la formación del núcleo real del mismo. Por razones que todavía no se conocen, dentro del mesociclón y hacia un lado parece desarrollarse una región, de no más de un kilómetro de diámetro, donde están reforzados la convergencia y el estiramiento. Las observaciones mediante el radar Doppler sugieren de nuevo que la intensificación del giro comienza arriba, a varios kilómetros de altura, para progresar luego con rapidez hacia el suelo. Sobre esa zona pequeña, el movimiento de rotación adquiere suficiente intensidad para que la tubería dinámica descienda hasta algunas decenas de metros por encima del suelo. En cuya vecindad el rozamiento impide, al frenar el movimiento de rotación, que se establezca el ajuste ciclostrófico.

En respuesta al gradiente de presión entre el núcleo del tornado y la atmósfera circundante, el aire fluye hacia el interior en una delgada capa próxima al suelo. Por su propia inercia, la penetración sobrepasa su radio de equilibrio, conservando su momento cinético y adquiriendo velocidad al acercarse al centro del núcleo antes de girar bruscamente e iniciar su movimiento helicoidal hacia arriba. Como resultado, las velocidades máximas del viento se observan en una pequeña región en forma de anillo de la base del vórtice. El rozamiento con el suelo acaba por limitar la velocidad de influjo de aire hacia la base y evita así que el tornado se rellene desde abajo.

Evolución y estructura

Una tormenta productora de tornados típica dura de dos a tres horas. Lo normal es que engendre sólo un episodio de vida bastante corta. La mayor parte de la vida de la tormenta se gasta en las fases inicial de organización y final de disipación. El período de madurez, durante el cual es más probable que se forme un tornado, abarca escasas decenas de minutos. En esta fase, la tormenta se mueve con respecto al suelo, barriendo e incorporando una continua provisión de aire húmedo e inestable. En raras ocasiones, la corriente ascendente y el ciclón tornádico asociado pueden llegar a alcanzar un régimen casi estacionario, en cuyo caso la tormenta se llama supercelular. En algunas supercélulas, la intensidad del tornado experimenta pulsaciones, creando una sucesión de tornados. Se han observado "familias de tornados" de hasta ocho miembros distribuidos sobre una distancia de 200 a 300 kilómetros. Menos frecuente es que un ciclón tornádico permanezca activo varias horas, formando un tornado único de larga duración que deje un rastro continuo de destrucción. De cuantos se tenga registro, el Tornado Triestatal del 18 de marzo de 1925 resultó el más catastrófico: causó 689 muertes a lo largo de una trayectoria de 352 kilómetros; se extendió desde el Sureste de Missouri hasta el Suroeste de Indiana, a través de Illinois.

Los vórtices tornádicos varían considerablemente en tamaño y forma. Deducir conclusiones acerca de la dinámica del núcleo del vórtice a partir de observaciones del embudo resulta arriesgado; en efecto, además de la estructura del núcleo, condicionan la morfología del embudo el contenido de humedad del aire, las propiedades del terreno y otros factores capaces de alterar incluso la duración de la vida del tornado. Lo que no obsta para que se formulen algunas generalizaciones.

Los tornados que la escala desarrollada por T. Theodore Fujita, de la Universidad de Chicago, clasifica como "débiles" (cuya velocidad máxima del viento se sitúa entre 55 y 160 kilómetros por hora) se caracterizan por su embudo, único y no turbulento, que suele tomar la forma de un cono invertido, largo y delgado, con una superficie lisa. El embudo frecuentemente no alcanza hasta el suelo; las velocidades verticales parecen ser máximas a lo largo del eje central. En contraste, el vórtice de un tornado clasificado como "intenso" (velocidades del viento entre 160 y 290 kilómetros por hora) se muestra turbulento, y su embudo, una ancha columna que casi siempre alcanza hasta el suelo, tiene una apariencia giratoria e hirviente. Las velocidades verticales

del viento en un tornado intenso tienden a ser máximas en un anillo alrededor del eje central; en el eje mismo se han reducido y se pueden haber invertido incluso, creando una corriente descendente. Entre ambos vórtices típicos, débil e intenso, hay, por supuesto, formas intermedias.

Muchos tornados considerados "violentos" (vientos que exceden los 290 kilómetros por hora) adoptan un aspecto completamente diferente: el núcleo central parece ser un "ojo" despejado y en calma, rodeado por dos o más vórtices subsidiarios. El aire que desciende sin girar en el ojo es aspirado desde arriba por la presión en el suelo, extremadamente baja; la claridad del ojo débese a que las gotículas de agua se evaporan a medida que el aire, en su descenso, se va calentando. En el suelo, esta corriente interior gira hacia fuera y choca con el aire que penetra desde el exterior del núcleo del vórtice. El flujo combinado se tuerce hacia arriba y forma vórtices secundarios en un anillo cilíndrico que rodea a la corriente central descendente. Los vórtices secundarios giran rápidamente alrededor de los ejes de sus propias hélices; al propio tiempo, giran alrededor de la línea central del tornado. Parece ser que las máximas velocidades de vientos en superficie conocidas por el hombre, próximas a los 425 kilómetros por hora, soplan en las bases de los vórtices subsidiarios. Esta estructura de vórtices múltiples interconectados se descubrió a principios del decenio de 1970, hallazgo del mayor interés porque permitió explicar los complicados "segados" cicloidales de destrucción que dejaban los tornados más potentes.

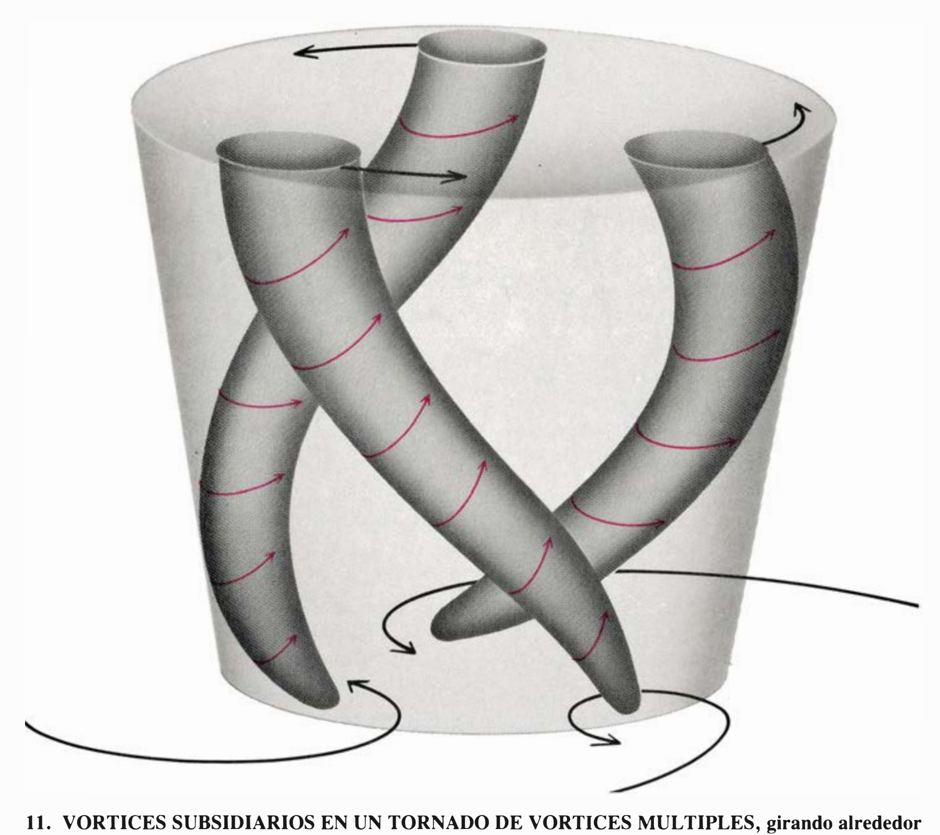
Preguntas sin respuesta

Pese a tales avances, muchas peculiaridades de los tornados continúan oscuras. En este sentido, el cuadro que hemos descrito de la cadena de sucesos que conducen a la formación de un tornado es incompleto, pues se aplica preferentemente a los tornados intensos. Los más débiles no se pueden desarrollar en la corriente ascendente principal de la tormenta, sino a lo largo del borde anterior (el "frente de turbonada"), donde el aire enfriado por la lluvia fluye hacia el exterior de la tormenta que lo produce, penetrando por debajo y obligando a elevarse al aire caliente que entra. Mas, por lo que se ve, existen procesos distintos que conducen a la concentración de movimiento giratorio necesario para generar un tornado, aunque se desconozca los pormenores de esos mecanismos y las relaciones que median entre ellos.

Lagunas fundamentales que se extienden hasta el núcleo del tornado. Apenas hay datos cuantitativos sobre las velocidades del viento y las caídas de presión en esta región. Tal información trasciende el interés académico: los arquitectos e ingenieros que trabajan en zonas sometidas a esos fenómenos desearían saber con qué grado de resistencia al viento necesitan construir sus edificios, sin pecar de excesiva cautela, que encarecería los costos, ni correr peligrosos riesgos. Los meteorólogos, por otro lado, precisan tal información para resolver cuestiones básicas: cómo se refuerza el giro en un mesociclón para crear un tornado, cómo está estructurada la corriente ascendente en el núcleo y cuál es su interacción con los vientos horizontales, cómo y a qué altura se funde el núcleo con la corriente general en el ciclón tornádico.

La naturaleza violenta de estos fenómenos ha estimulado a los meteorólogos a estudiar tipos de vórtices columnares, más fáciles de abordar, con algún éxito. En 1971, las observaciones realizadas por Fujita, desde un avión, de una gran tolvanera de vórtices múltiples (torbellino relativamente modesto) produjo la primera confirmación de la idea según la cual los vórtices múltiples existirían igualmente en los tornados violentos. Desde 1970, una larga serie de experimentos se ha centrado en las trombas (un tipo de vórtice que se da sobre los océanos), que tienden a alcanzar velocidades del viento inferiores a las de sus parientes terrestres; son frecuentes, a principios de verano, en la vecindad de Cayo Hueso, Florida. Se han fotografiado las trombas y se ha volado remolcando conjuntos de instrumentos a través de su núcleo. No está claro, sin embargo, hasta qué punto los datos de las trombas son aplicables a los tornados, en particular a los incluidos entre las categorías más violentas. La corriente en los niveles más bajos de una tromba puede diferir de la correspondiente a un tornado, porque un vórtice que se desarrolla sobre el océano atraviesa una superficie más lisa y, por tanto, encuentra menos rozamiento.

No hay sucedáneo que sustituya la observación directa de los tornados. Desde las postrimerías del decenio de 1960, los investigadores de la Universidad de Oklahoma y del Laboratorio Nacional de Tormentas Intensas de la Administración Nacional Oceánica y



11. VORTICES SUBSIDIARIOS EN UN TORNADO DE VORTICES MULTIPLES, girando alrededor de su propio eje así como alrededor del eje central del tornado padre. En un tornado violento, la extrema caída de presión en el núcleo cerca del suelo puede producir una corriente descendente a lo largo del eje central. Los vórtices subsidiarios se forman hacia el borde del vórtice padre, donde la corriente descendente se encuentra con aire que fluye hacia el núcleo. Los vientos más intensos y las caídas de presión más abruptas se producen en la base de los vórtices subsidiarios. (Ilustración realizada por George V. Kelvin.)

Atmosférica (NOAA) en Norman, Oklahoma, han venido persiguiendo sistemáticamente tormentas tornádicas en la esperanza de obtener fotografías y películas de alta calidad que se pudieran comparar con las imágenes del radar y usarlas para estimar velocidades del viento. Desde 1981, Howard B. Bluestein y sus alumnos de la universidad han ampliado este programa y se han aprestado a instalar instrumentos de superficie en la trayectoria de mesociclones que se acercan. El conjunto, llamado humorísticamente TOTO (no sólo por el perro de Dorotea en *El Mago de Oz*, sino también por las iniciales de *Totable Tornado Observatory*, Observatorio de Tornados Calculables), fue proyectado por A. J. Bedard, Jr., del Laboratorio de Propagación de Ondas de la NOAA en Boulder, Colorado.

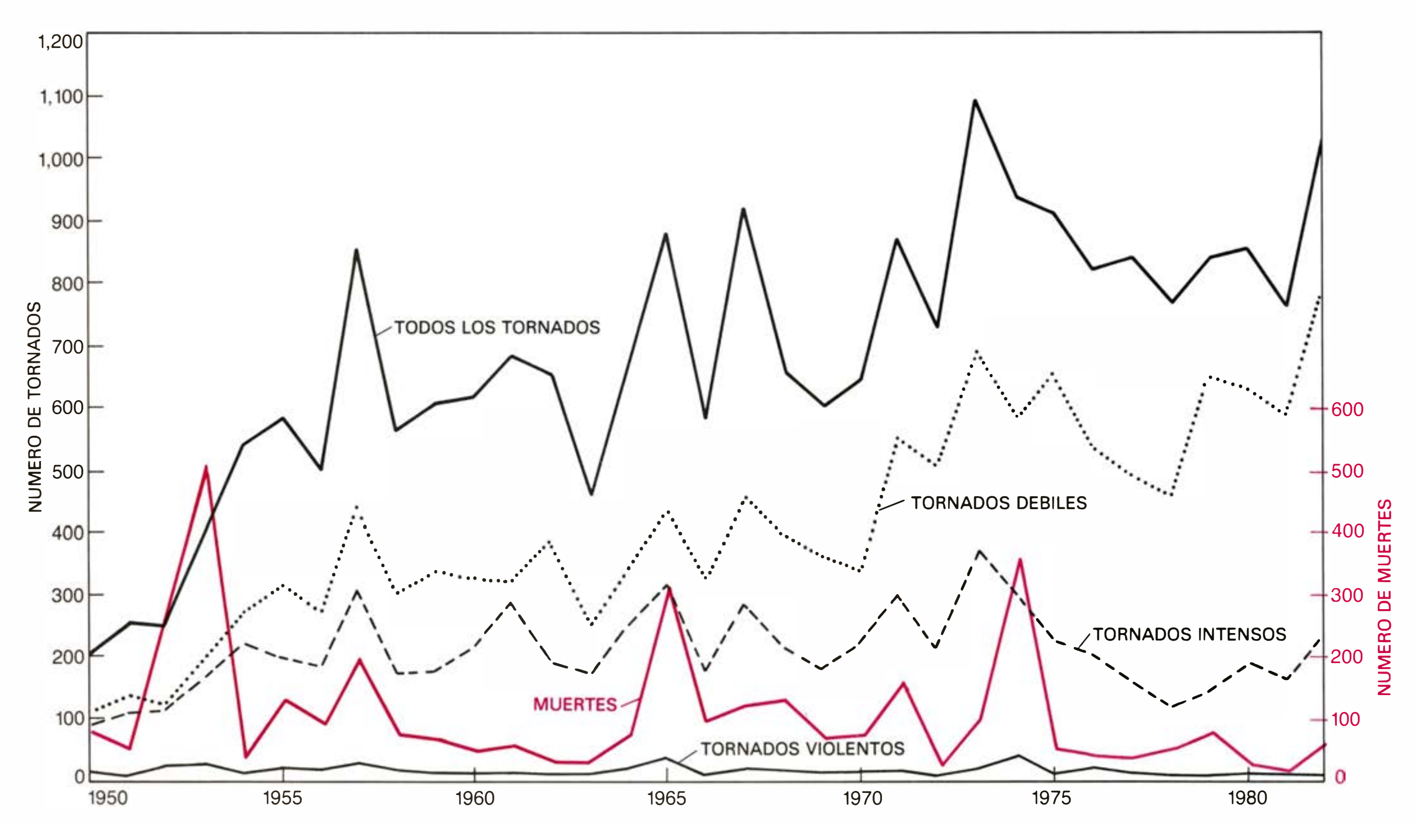
Se ha equipado a TOTO para que mida la dirección y velocidad del viento, la presión y temperatura atmosféricas y la intensidad del campo eléctrico bajo un ciclón tornádico. Hasta ahora, Bluestein y sus colaboradores han obtenido datos de cierto número de mesociclones; han cosechado ya un sorprendente descubrimiento, por lo menos: la caída de presión bajo un ciclón tornádico no es cuanta podía esperarse, lo que sugiere que la máxima caída de presión se concentra muy cerca del núcleo.

La exploración directa del núcleo por encima del suelo quizá llegue gracias a los cohetes desarrollados por Stirling A. Colgate, del Instituto de Minas y Tecnología de Nuevo México. Los cohetes, pequeños, se lanzan desde una avioneta a uno o dos kilómetros de distancia del tornado; los valores registrados por sus instrumentos se transmiten a la avioneta por radio. Lanzamientos de ensayo realizados en trombas y dos tornados han mostrado el valor de la idea, aunque habrá que perfeccionar el equipo.

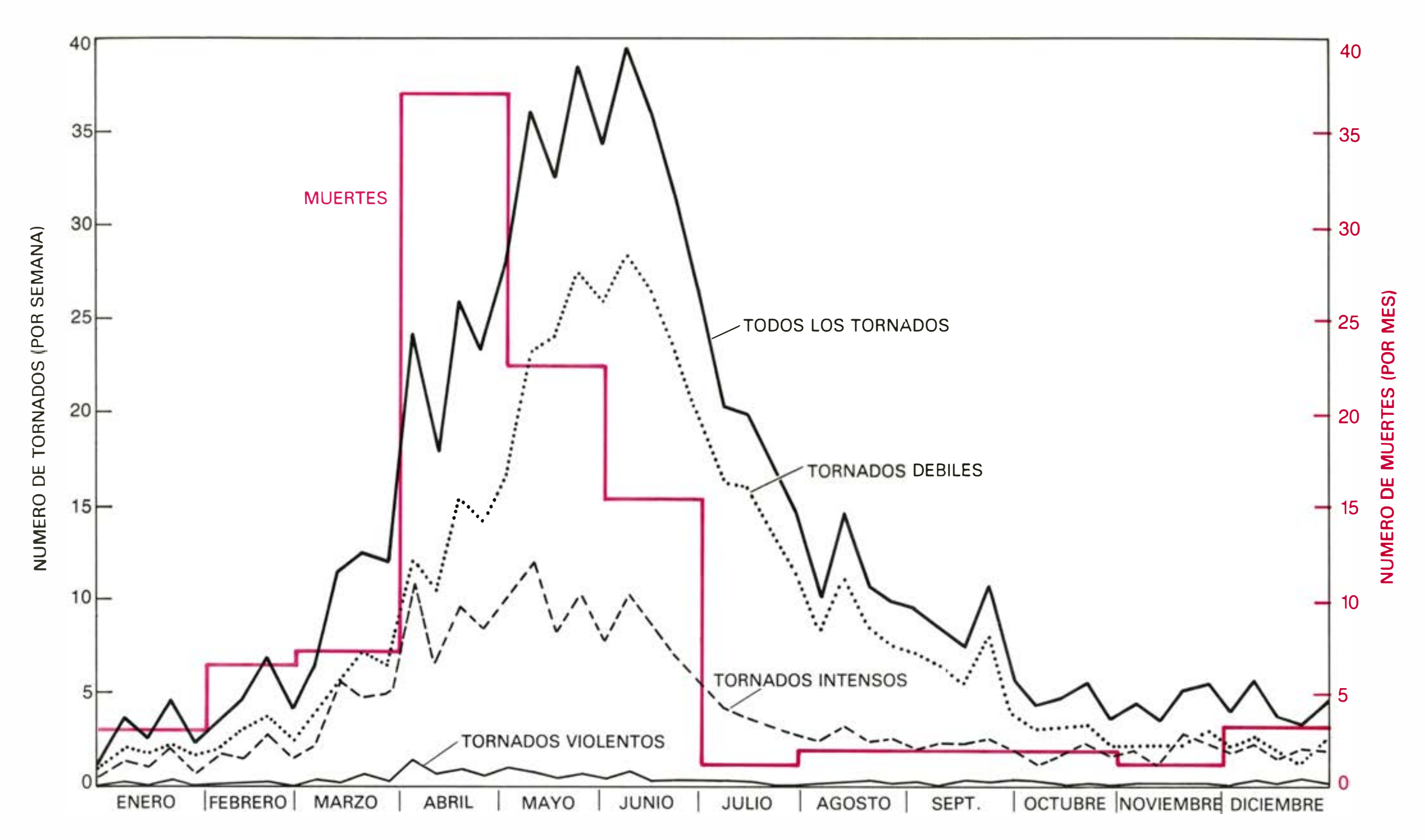
Sistemas Doppler

Se espera, sin embargo, que los mayores avances en nuestro conocimiento provengan de la aplicación de instrumentación de exploración remota: el radar Doppler y su nuevo compañero, el lidar Doppler. Los sistemas Doppler miden el corrimiento de frecuencia entre las microondas emitidas (o la del haz de luz emitido) y sus ecos procedentes de gotículas de agua o partículas de polvo atmosféricas. La frecuencia se corre hacia valores más altos si el blanco avanza hacia el radar, hacia valores más bajos si se aleja del mismo; no varía en absoluto si el blanco se está moviendo de lado. La componente de la velocidad del viento a lo largo de la visual entre el instrumento y el blanco resulta ser, por consiguiente, proporcional a la magnitud del corrimiento de frecuencia.

Las medidas realizadas a lo largo de los últimos diez años mediante la técnica del radar Doppler han revelado los grandes rasgos de la estructura interna del flujo que se desarrolla en el interior de una tormenta. Los mesociclones, en particular, producen configuraciones fácilmente reconocibles en la pantalla del radar, porque sus fuertes vientos en torbellino cambian de dirección dentro de una pequeña superficie. La mayor parte de lo que se sabe acerca de la evolución de los mesociclones, verbigracia, el hecho de que la rotación parezca iniciarse en la troposfera media y extenderse hacia abajo y hacia arriba, se ha deducido de los datos aportados por el



12. TOTAL ANUAL de tornados registrados en los Estados Unidos. Muestra un constante aumento; más que a un incremento real, se atribuye a una mejor red de observación y registro. El gobierno comenzó a recoger sistemáticamente información sobre los tornados en 1953 y ha ido después extendiendo su banco de datos (a cargo del Centro Nacional de Predicción de Tormentas Intensas) hacia atrás hasta 1950. Se clasifican según la escala de Fujita, basada en la velocidad del viento, en débiles, intensos y violentos. No todos ellos se pueden clasificar, razón por la cual el total es mayor que la suma de las tres categorías. El aumento del total refleja principalmente un aumento del número de tornados débiles observados. El número de tornados intensos y violentos, que es menos probable que escapen a la observación, muestra poca variación. Aunque los considerados violentos no llegan al 3 por ciento, dan cuenta de dos tercios de todas las muertes causadas por este fenómeno. Los picos de la curva de muertes reflejan los propios de la curva de tornados violentos.



13. PROMEDIO SEMANAL de tornados desde 1950 hasta 1982. La mayoría (alrededor del 74 por ciento) se producen entre marzo y julio. Los tornados más violentos y el mayor número de muertes ocurren en abril, cuando el contraste de temperatura a través del frente polar es máximo. Después, el contraste se hace más débil y lo propio ocurre con las tormentas y tornados resultantes. Las cifras de muertes son promedios mensuales de 1953 a 1982.

radar Doppler. La utilidad de este instrumento está de momento condicionada por su resolución espacial: los ecos que se reciben, de los que se infieren las velocidades del viento y otros datos, se refieren a una región cilíndrica de unos 300 metros de altura y unos 175 de diámetro a lo largo del eje del haz. Esto significa que, mientras que el radar Doppler puede fácilmente recoger información acerca de las corrientes en una tormenta tornádica, a duras penas llega a resolver la verdadera región del núcleo de los mayores tornados.

Dussan Zrnic y sus colaboradores, del Laboratorio de Tormentas Intensas, han desarrollado técnicas especiales de procesado de la señal Doppler para obtener datos de velocidad del viento en el caso de los tornados gigantes. Un violento remolino de este tipo, con un embudo de diámetro superior a los 1600 metros, atacó Binger, Oklahoma, el 22 de mayo de 1981. Las medidas de radar mostraron que el embudo se extendía hasta la misma cima de la nube que lo creaba (una altura de 12 kilómetros), que se formó inicialmente en altura y que parecía tener una corriente descendente central (según era de esperar en un vórtice violento de tornados múltiples). Sus velocidades de viento resultaron ser de unos 280 kilómetros por hora.

Grupos de investigación del Laboratorio de Tormentas intensas y del Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Boulder intentan mejorar la resolución del radar Doppler para que pueda producir imágenes de tornados pequeños. La técnica que parece más adecuada para revelar los pormenores de las corrientes en el núcleo es, sin embargo, el lidar Doppler infrarrojo, que tiene un haz más estrecho (y consiguientemente, mayor resolución) porque la radiación infrarroja es de longitud de onda más corta. En los últimos años, Ronald L. Schwiesow y sus colegas del Laboratorio de Propagación de Ondas ensayaron una unidad lidar portátil en trombas y midieron con éxito los vientos en el núcleo a varias alturas y distancias del centro. Aunque de momento no se haya empeñado ningún esfuerzo en extender este trabajo a los tornados, es obvia su importancia para el futuro.

Más difícil que conocer la dinámica de un tornado se ofrece la predicción del mismo. Se confía en que la aplicación de la técnica Doppler aportará pronto mejoras en este campo. Esperanza que se funda en el rendimiento del radar Doppler para detectar los mesociclones; por cuya razón el Servicio Nacional del Tiempo de los Estados Unidos planea instalar unidades Doppler en muchas de sus estaciones meteorológicas a principios del decenio de 1990. Con la ayuda de datos de globos meteorológicos y satélites, las predicciones se apuntan ya algunos éxitos al señalar, con seis u ocho horas de antelación, regiones a vigilar donde es probable la intensa actividad tormentosa y posible la formación de tornados. Los nuevos radares ayudarán a los predictores a localizar las contadas tormentas que pueden sembrar tornados de entre las muchas que pueden desarrollarse en la región de vigilancia. El resultado deberá ser una mayor garantía en los avisos, con menos falsas alarmas.

Sin embargo, estos avisos seguirán viniendo, en el mejor de los casos, de media a una hora antes de que el remolino ataque. Por ser los tornados fenómenos tan localizados y por estar su formación y comportamiento controlados por tantas variables, es probable que continúen siendo en gran parte imprevisibles. Lo que parece deducirse de recientes avances de la teoría meteorológica y de la tecnología de observación es que no hay razón para que su comportamiento continúe envuelto en el misterio.

La visión por humanos y máquinas

¿Cómo ven los animales? ¿Cómo podrían los ordenadores? Un estudio de la visión estereoscópica sirve de guía a la investigación de ambas cuestiones. La neurofisiología sugiere programas de ordenador; éste, qué buscar en el cerebro

Tomaso Poggio

La entrada en servicio de ordenadores cada vez más potentes y refinados acostumbra a provocar comparaciones con el cerebro humano, comparaciones que es preciso ir tomando más en serio conforme se vayan aplicando los ordenadores a tareas, actividades y capacidades que siempre se consideraron fundamentalmente humanas. Tanto así, que existe amplia y difundida confianza en que generaciones venideras de robots y ordenadores dispondrán de capacidades sensoriales, motoras e incluso "intelectuales" cercanas a las nuestras. ¿Cómo podrían diseñarse tales máquinas? ¿Podrá servirnos de orientación y guía el conocimiento del cerebro humano, en cuyo estudio tanto estamos hoy progresando? Al mismo tiempo, ¿podrían los avances que se realicen en "inteligencia artificial" ayudarnos a comprender nuestro cerebro?

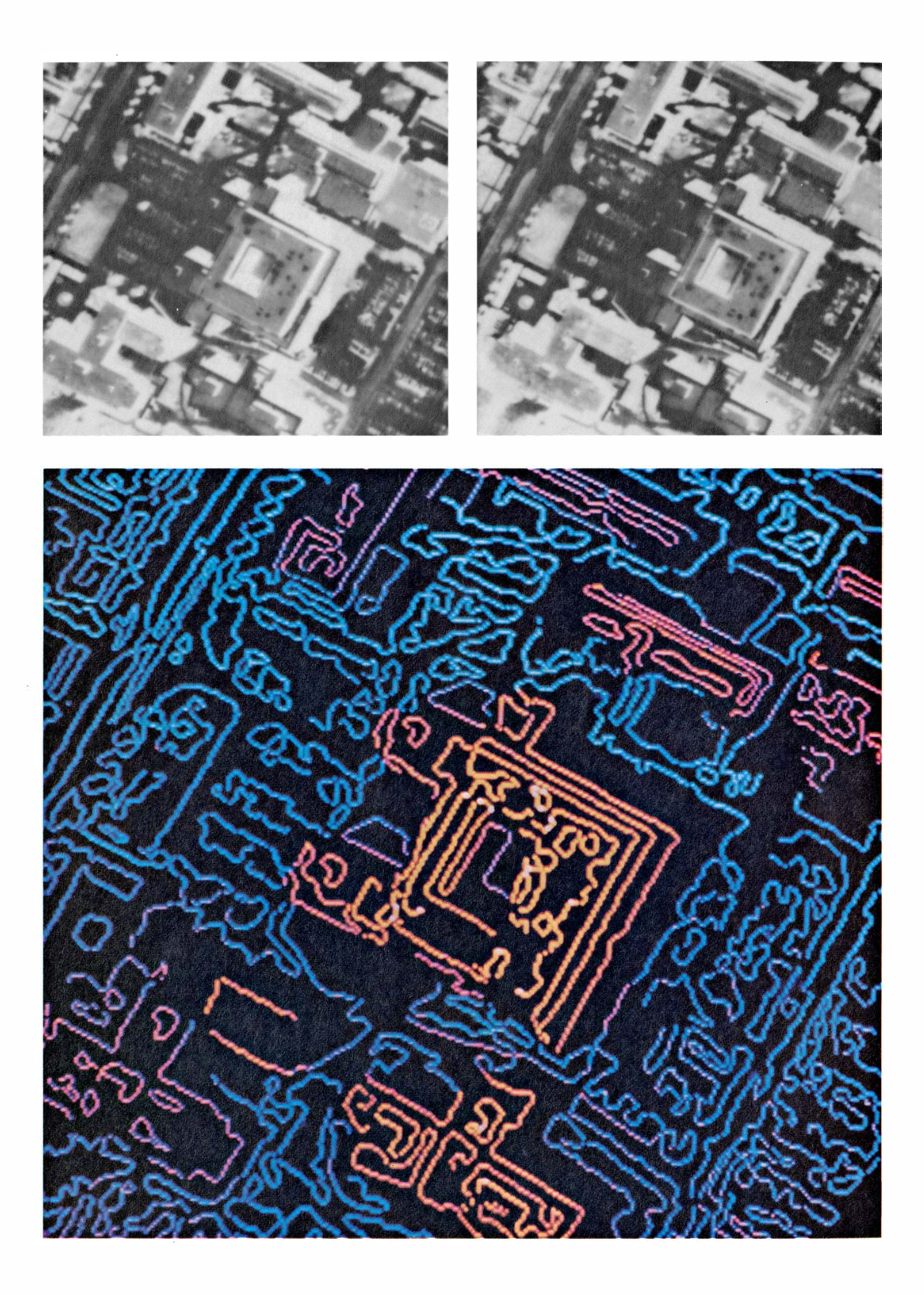
Analizadas en el plano material, de *hardware*, las diferencias son grandes. Las células nerviosas, o neuronas, de un cerebro son estructuras delicadas y diminutas, envueltas por una compleja membrana, compactamente alojadas en un medio de células de sostén, encargadas también de controlar un ambiente químico complejo y seguramente muy variable. Las células nerviosas se parecen muy poco a los cristales de material semiconductor o a los hilos de conexión con los que se construyen los ordenadores. No menos grandes son las diferencias de organización de los componentes materiales de cerebro y ordenador. Las conexiones entre neuronas son muy numerosas (una neurona cualquiera puede recibir muchos millares de señales de entrada) y su distribución es tridimensional. En los ordenadores, las líneas de conexión entre los distintos componentes de los circuitos están limitadas, por la actual tecnología de estado sólido, a números relativamente reducidos, y a que su disposición sea, más o menos, bidimensional.

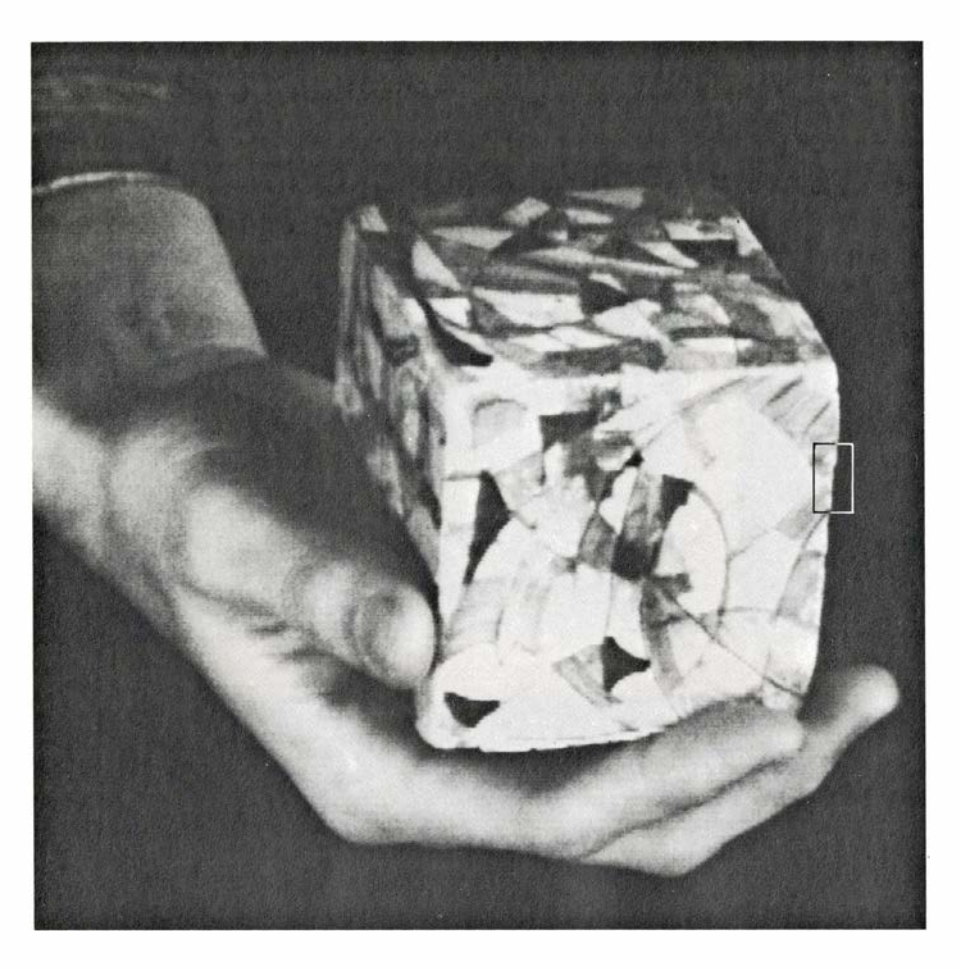
Y no menos grandes son las diferencias en la transmisión de señales. Los impulsos eléctricos de naturaleza binaria (activado/desconectado), característicos de los ordenadores, quedan hasta cierto punto reflejados en las señales todo/nada conducidas a lo largo de las fibras nerviosas; pero el cerebro se vale, además, de señales eléctricas graduadas, de sustancias químicas mensajeras, o neurotransmisores, y de mecanismos de transporte de iones. En cuanto a organización temporal, las diferencias son inmensas. Los ordenadores efectúan un procesamiento secuencial de la información (a razón de un paso cada vez), si bien a ritmo muy rápido. El curso temporal de su funcionamiento está gobernado por un "reloj" que sincroniza de extremo a extremo el ordenador. Lo que hasta ahora se conoce del cerebro hace pensar que su funcionamiento es mucho más lento, pero que analiza la información de modo concurrente según millones de canales, no dependientes de reloj alguno.

¿En qué se asemejan, por tanto, cerebros y ordenadores? Debe, obviamente, existir un plano en el que dos mecanismos cualesquiera puedan compararse. Se pueden comparar, por ejemplo, las tareas que son capaces de desempeñar. "Llevar las buenas noticias de Pinto a Valdemoro" propone una tarea que tanto puede realizarse por transmisión vía satélite, por telégrafo, por correos a caballo, como por palomas mensajeras (a menos que se imponga alguna restricción, por ejemplo, la tardanza). Si, por consiguiente, declaramos que cerebros y ordenadores funcionan como sistemas procesadores de información, podremos idear descripciones de las tareas que realicen, aplicables por igual a unos y a otros. Dispondremos de un lenguaje común en que analizarlos: el lenguaje del procesamiento de información. Observemos que en este lenguaje las descripciones de las tareas quedan desconectadas de las descripciones del medio material que las lleva a cabo. Tal separabilidad se encuentra en los cimientos mismos de la ciencia llamada inteligencia artificial. Sus objetivos consisten en potenciar la utilidad de los ordenadores, dotándolos para ello de capacidades "inteligentes" y, yendo más allá, comprender los principios que hacen posible la inteligencia misma.

En ningún otro campo han sido descritas más precisa y rigurosamente las tareas del procesamiento de información que en el estudio de la visión. La visión es, por una parte, la modalidad sensorial predominante en los humanos. Si queremos crear robots capaces de ejecutar tareas complejas de manipulación, y de hacerlo en medios diversos y cambiantes, sin duda tendremos

1. **DOTAR A UN ORDENADOR DE VISION** estereoscópica obliga a plantearse la visión como problema de procesamiento de información. En la parte superior de la página contigua se muestran fotografías aéreas proporcionadas por Robert J. Woodham, de la Universidad de British Columbia. Vemos en ellas parte de su ciudad universitaria. Remedan en dos aspectos los datos visuales en que se funda la visión biológica. Primero, fueron tomadas desde ángulos ligeramente distintos, por lo que los objetos de una de las imágenes ocupan en la otra posiciones levemente distintas. También los dos ojos de los humanos observan el mundo desde ángulos algo distintos. Segundo, las imágenes se obtuvieron mediante un mosaico de sensores microelectrónicos, cada uno de los cuales mide la intensidad luminosa de un determinado rayo visual. Las células fotorreceptoras del ojo humano hacen algo muy parecido. El mapa de la parte inferior se generó por ordenador siguiendo un algoritmo, esto es, un procedimiento, ideado por David Marr y el autor, en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y que W. Eric L. Grimson desarrollaría ulteriormente en el mismo centro. El ordenador filtró las imágenes para magnificar los cambios de intensidad espacial. Seguidamente efectuó la estereopsis: emparejó ciertos rasgos de una y otra imagen, determinó las disparidades entre sus posiciones y calculó sus profundidades relativas en el mundo tridimensional. En el mapa, la elevación crece del azul al rojo.





225	221	216	219	219	214	207	218	219	220	207	155	136	135	130	131	125
213	206	213	223	208	217	223	221	223	216	195	156	141	130	128	138	123
206	217	210	216	224	223	228	230	234	216	207	157	136	132	137	130	128
211	213	221	223	220	222	237	216	219	220	176	149	137	132	125	136	121
216	210	231	227	224	228	231	210	195	227	181	141	131	133	131	124	122
223	229	218	230	228	214	213	209	198	224	161	140	133	127	133	122	133
220	219	224	220	219	215	215	206	206	221	159	143	133	131	129	127	127
221	215	211	214	220	218	221	212	218	204	148	141	131	130	128	129	118
214	211	211	218	214	220	226	216	223	209	143	141	141	124	121	132	125
211	208	223	213	216	226	231	230	241	199	153	141	136	125	131	125	136
200	224	219	215	217	224	232	241	240	211	150	139	128	132	129	124	132
204	206	208	205	233	241	241	252	242	192	151	141	133	130	127	129	129
200	205	201	216	232	248	255	246	231	210	149	141	132	126	134	128	139
191	194	209	238	245	255	249	235	238	197	146	139	130	132	129	132	123
189	199	200	227	239	237	235	236	247	192	145	142	124	133	125	138	128
198	196	209	211	210	215	236	240	232	177	142	137	135	124	129	132	128
198	203	205	208	211	224	226	240	210	160	139	132	129	130	122	124	131
216	209	214	220	210	231	245	219	169	143	148	129	128	136	124	128	123
211	210	217	218	214	227	244	221	162	140	139	129	133	131	122	126	128
215	210	216	216	209	220	248	200	156	139	131	129	139	128	123	130	128
219	220	211	208	205	209	240	217	154	141	127	130	124	142	134	128	129
229	224	212	214	220	229	234	208	151	145	128	128	142	122	126	132	124
252	224	222	224	233	244	228	213	143	141	135	128	131	129	128	124	131
255	235	230	249	253	240	228	193	147	139	132	128	136	125	125	128	119
250	245	238	245	246	235	235	190	139	136	134	135	126	130	126	137	132
240	238	233	232	235	255	246	168	156	141	129	127	136	134	135	130	126
241	242	225	219	225	255	255	183	139	141	126	139	128	137	128	128	130
234	218	221	217	211	252	242	166	144	139	132	130	128	129	127	121	132
231	221	219	214	218	225	238	171	145	141	124	134	131	134	131	126	131
228	212	214	214	213	208	209	159	134	136	139	134	126	127	127	124	122
219	213	215	215	205	215	222	161	135	141	128	129	131	128	125	128	127

2. EN SU COMIENZO, LA VISION, tanto para un animal como para un ordenador, viene a ser una matriz o tabla de niveles de gris, una representación, punto por punto, de la intensidad de luz; la genera un retículo de detectores, sea en el ojo o en una cámara digital. La imagen de lo alto es una de esas matrices; fue producida por una cámara digital con un retículo de 576 por 454 elementos de imagen, o "pixeles". La tabla inferior ofrece los valores de intensidad correspondientes a la porción recuadrada.

que dotarlos de potencia visual adecuada. La visión, por otra parte, sigue mostrándosenos esquiva. Estamos los humanos bien dotados para ver; nuestro cerebro lo hace fácil y rápidamente. Se trata, sin embargo, de una colosal tarea de procesamiento de información. No subestimaríamos su dificultad si el acto de ver nos exigiera un esfuerzo consciente, como nos lo exige, por ejemplo, sumar mentalmente dos números. Caemos, por el contrario, fácilmente en prejuicios simplistas, no computacionales, con respecto a lo que el acto de ver conlleva.

En última instancia, lo que se desea, como es obvio, es comprender de qué modo consigue el soporte físico biológico (las neuronas y sus interconexiones sinápticas) resolver el problema de la visión. Ahora bien, no es este problema exclusivamente anatómico o fisiológico; no reside meramente en saber cómo actúan las neuronas o cómo se encuentran interconectadas. Enfocado desde el procesamiento de información (sea por el cerebro o por un ordenador) el problema se plantea en muchos niveles: el nivel computacional (¿cuáles son las tareas de cómputo que debe llevar a cabo un sistema visual?); el nivel algorítmico (¿cuál es la sucesión de pasos que consigue ejecutar la tarea?), y, por fin, el nivel material, o de soporte físico (¿qué neuronas, o qué circuitos electrónicos, podrían ejecutar el algoritmo?). Atacar el problema de la visión requiere diversas otras ayudas, entre ellas, pruebas de naturaleza psicofísica (es decir, conocer en qué grado alcanzan a ver las personas) y datos neurofisiológicos (conocimiento de lo que las neuronas son capaces de hacer). La parte más crítica del problema consiste en hallar algoritmos operativos, porque los algoritmos están constreñidos tanto por los problemas computacionales como por los materiales disponibles.

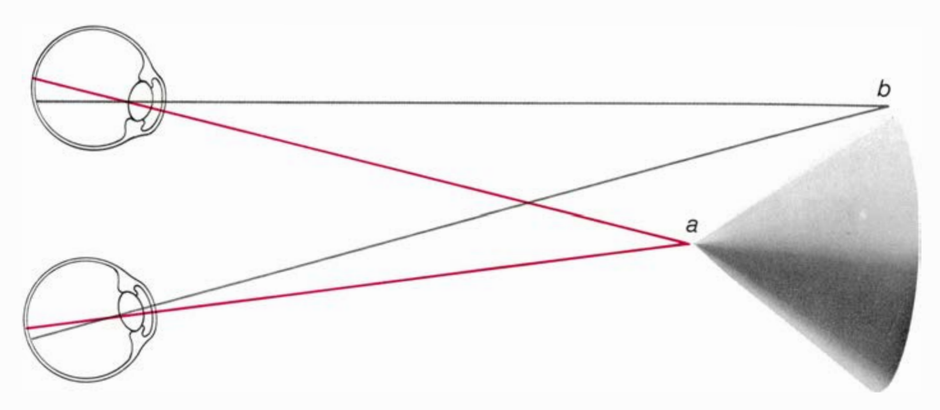
Esbozaré en estas páginas un esfuerzo en el que tomo parte, encaminado a explorar una sucesión de algoritmos proyectados, ante todo, con ánimo de extraer información de las imágenes visuales (principalmente, detectar los bordes, esto es, los contornos donde se producen cambios pronunciados de intensidad luminosa), a fin de calcular después, partiendo de tales bordes, la profundidad de los objetos del mundo tridimensional. Me fijaré sobre todo en un aspecto concreto de la tarea, la llamada estereopsis, o visión estereoscópica. No es para ello la menor de las razones el papel fundamental que la vi-

sión estereoscópica ha desempeñado en el trabajo que sobre la visión hemos realizado mis colegas y yo en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts. La estereopsis, en particular, ha servido de estímulo para examinar de cerca los pasos más elementales del procesamiento de información visual. Y como antes, la estereopsis se nos presenta con una sencillez sospechosa. Al igual que con tantas otras tareas que el cerebro desempeña sin esfuerzo, el desarrollo de un sistema automático capaz de visión estereoscópica ha demostrado ser de una dificultad sorprendente. Por último, en el estudio de la estereopsis tenemos la ventaja de disponer de un gran cuerpo de datos psicofísicos, que definen y delimitan el problema.

La información disponible en el origen del proceso de visión es una tabla, o matriz, bidimensional de medidas de la cantidad de luz reflejada en dirección al ojo, o a una cámara, desde los puntos situados en la superficie de los objetos del mundo visible tridimensional. En el ojo humano, tales mediciones las efectúan los fotorreceptores (conos y bastoncilios), de los que disponemos de más de 100 millones. En la cámara que usamos en el Laboratorio de Inteligencia Artificial, los procesos son muy diferentes, pero los resultados, similares. Las medidas se realizan en ella mediante sensores optoelectrónicos, que generan una matriz de 1000 por 1000 valores de intensidad luminosa. Cada valor es un elemento de imagen, llamado también celdilla, o *pixel* (*pict*ure *el*ement).

Es en ambos casos inconcebible que la laguna que separa la imagen "en rama" (la gran matriz de valores generada por el ojo o la cámara) de la visión (que consiste en saber *qué* hay en torno y *dónde* se encuentra) pueda vadearse de una sola zancada. Llegamos a la conclusión de que la visión requiere diversos procesos –que concebimos como módulos–, operando en paralelo sobre la imagen en bruto, y que producen representaciones intermedias de las imágenes, sobre las cuales pueden operar otros procesos. Por ejemplo, en la reconstrucción de la imagen geométrica tridimensional del mundo intervienen, según parece, varios módulos de visión. En una breve relación de tales módulos tendríamos que incluir mecanismos capaces de deducir formas a partir de luces y sombras, a partir de la textural visual, del movimiento, de los contornos, de las oclusiones y de la estereopsis. Algunos de ellos pueden operar directamente sobre la imagen en rama (las medidas de intensidad). Sin embargo, con frecuencia los módulos operan más eficazmente sobre representaciones intermedias.

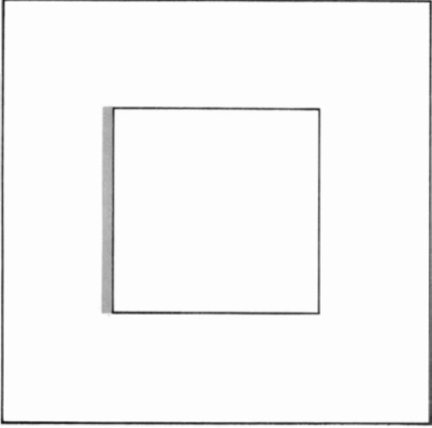
La estereopsis es consecuencia de que nuestros dos ojos observan el mundo visual con ángulos ligeramente distintos. En otras palabras, al mirar, los ojos convergen ligeramente, con lo que sus ejes de visión concurren en un cierto punto del mundo visual. Se dice entonces que los ojos han fijado tal punto; es decir, la imagen del punto cae sobre el centro de visión de cada retina. Cualquiera de los puntos vecinos situados en el campo visual se proyectará entonces en un punto de cada retina situado a cierta distancia del centro de visión. Esta distancia no será, en gene-

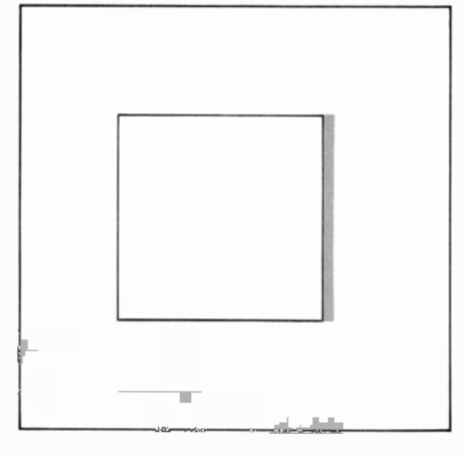


3. DISPARIDADES BINOCULARES que subyacen a la estereopsis. Se suscitan porque, al mirar, los ojos convergen ligeramente; los ejes de visión se cortan entonces en un punto del mundo exterior (*a*). Se dice que tal punto está "fijado". Otro punto, no alejado del primero (*b*), se proyectará en un lugar de la retina situado a cierta distancia del centro de visión. Tal distancia no será idéntica en ambos ojos.









4. ESTEREOGRAMAS DE PUNTOS ALEATORIOS, ideados por Bela Julesz, de AT & T Bell Laboratories. Son texturas visuales sin otros datos para la visión estereoscópica que las disparidades binoculares. Los estereogramas propiamente dichos son una misma textura de puntos blancos y negros (*arriba*). En uno de ellos, se desplaza hacia la izquierda un cuadrado de la textura; en el otro, hacia la derecha (*abajo*). Los huecos producidos en cada imagen se han rellenado con más puntos aleatorios (*zonas grises*).

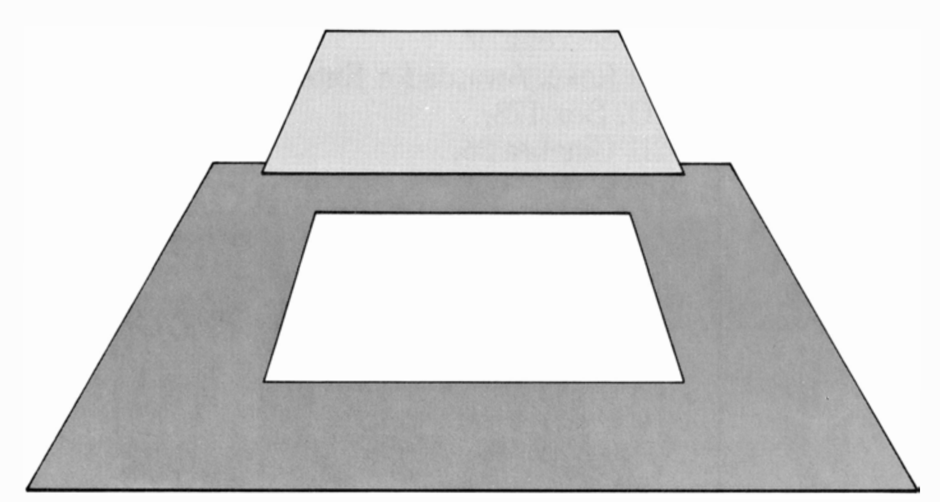
ral, la misma para uno y otro ojo; en realidad, la disparidad de distancias dependerá de la profundidad del punto del campo visual con respecto al punto fijado.

La estereopsis reside, así pues, en la decodificación de la tridimensionalidad a partir de las disparidades producidas por la visión binocular. Pudiera en principio parecer que se trata de un problema trivial de trigonometría, y ello nos hace pensar en programar un ordenador para resolverlo de este modo. Mas tal intento fracasaría. Nuestra propia facilidad para la estereopsis nos lleva a dejar de lado la dificultad fundamental de la tarea, que podremos comprender tan pronto enunciemos formalmente los pasos que el problema conlleva: cuatro; a saber: seleccionar, a partir de una imagen retiniana, una localización en el espacio; identificar esa misma localización en la otra imagen retiniana; medir sus posiciones y calcular, a partir de la discrepancia de ambas medidas, la distancia al lugar observado.

Los dos últimos pasos son, efectivamente, ejercicios de trigonometría (al menos, en los casos que examinamos en este artículo). Pero los dos primeros son de naturaleza diferente. Exigen, en efecto, encontrar en cada ojo la proyección de un mismo punto del mundo físico. Podemos imaginar que un grupo de fotorreceptores contiguos miran según una recta visual hacia una porción de superficie de un determinado objeto. Es preciso entonces reconocer los fotorreceptores que miran hacia esa misma porción desde el ojo contrario. A causa de la disparidad binocular, no se encontrarán en idéntica posición con respecto al centro de visión.

Como es evidente, aquí reside la dificultad. Para nosotros, el mundo visual contiene superficies que en general están inequívocamente identificadas, porque se encuentran dispuestas según relaciones espaciales específicas. Es preciso recordar, no obstante, que la visión da comienzo a partir nada más que de una matriz de intensidades de luz, medidas punto a punto. ¿Pudiera ser que el cerebro fuera emparejando las pautas y regularidades de intensidad luminosa recibidas en un ojo con las del otro? Probablemente no. Experimentos realizados con ordenadores imponen limitaciones a la eficacia del emparejamiento; además, en lo concerniente al sistema visual humano, las pruebas de carácter fisiológico y psicofísico hablan en contra de esta hipótesis. Para empezar, una determinada parcela de superficie puede no reflejar hacia cada ojo la misma intensidad de luz. Y lo que es más grave, parcelas de la superficie ampliamente separadas en el mundo visual pueden muy bien tener la misma intensidad. Emparejar tales superficies sería incorrecto.

Un descubrimiento realizado en los AT & T Bell Laboratories por Bela Julesz nos hace ver el problema en toda su extensión. Julesz ideó pares de lo que llamó “estereogramas de puntos aleatorios”. Se trata de estímulos visuales sin más contenido de información que sus disparidades binoculares. Para preparar cada par, Julesz generó una textura aleatoria de puntos blancos y negros, de la que produjo dos copias. En una de ellas, Julesz desplazó hacia un lado cierta porción del motivo aleatorio, un cuadrado, pongamos por caso. En el otro ejemplar, el desplazamiento del cuadrado se hizo en sentido contrario; el hueco producido en cada caso se rellenó con más textura aleatoria. Vistas de una en una, cada una de las preparaciones parecía totalmente aleatoria. Pero, a través de un estereoscopio, donde cada ojo sólo ve una de ellas y el cerebro funde en una las dos imágenes, el resultado fue sorprendente. El cuadrado daba vívidamente la impresión de flotar, bien frente a su entorno, bien por detrás de él. Como resulta obvio con este experimento, la estereopsis no requiere la previa percepción de objetos, ni el reconocimiento de formas.



5. SE PERCIBE UNA VIVIDA SENSACION DE PROFUNDIDAD al mirar a través de un estereoscopio los estereogramas aleatorios de la figura 4. Cada ojo ve entonces sólo una imagen del par; el cerebro funde ambas en una. La estereopsis, por tanto, no exige el reconocimiento de los objetos del mundo visual.

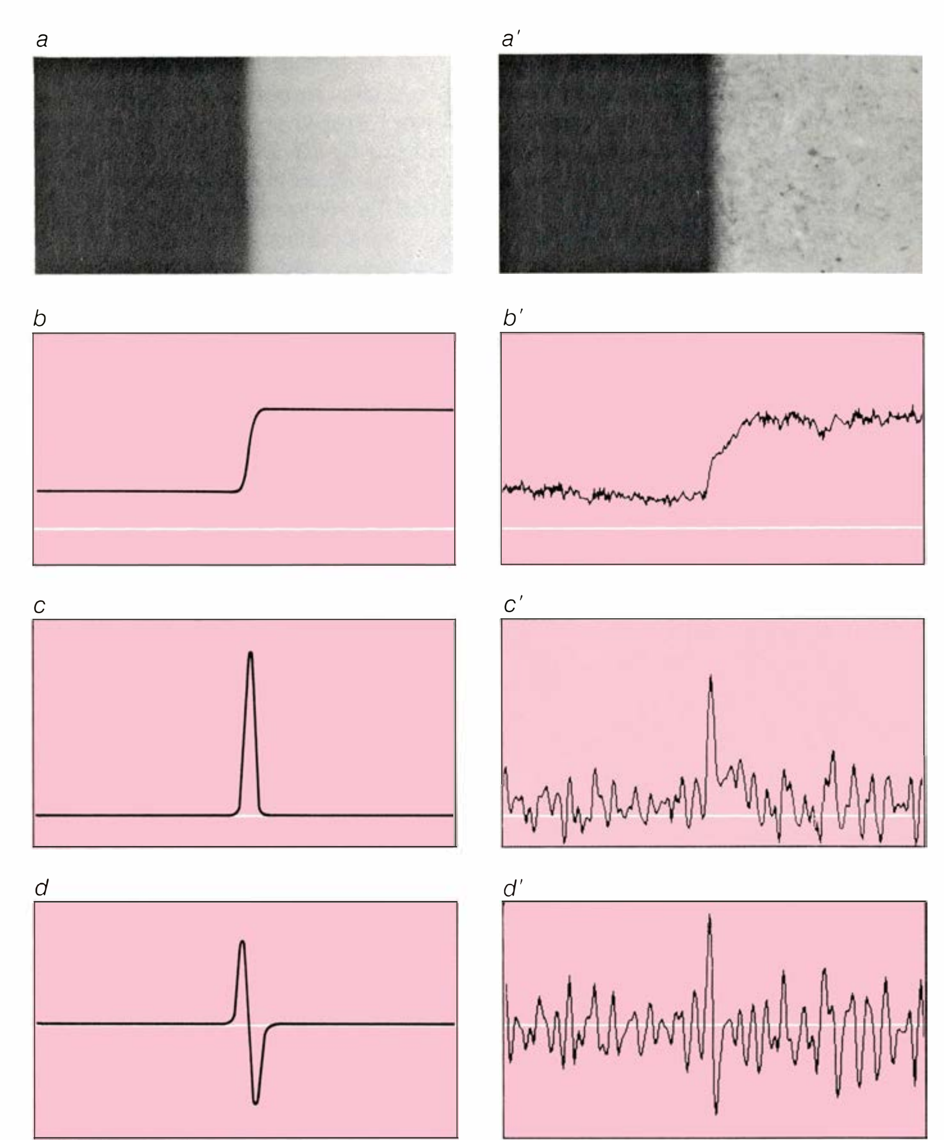
El descubrimiento de Julesz permite formular el objetivo computacional de la estereopsis: consiste en la extracción de disparidades binoculares a partir de un par de imágenes, sin que se precise para ello disponer de rasgos obvios de carácter monocular. El descubrimiento permite, además, formular el problema computacional inherente a la estereopsis. Es el problema de correspondencia: el emparejamiento de elementos pertenecientes a ambas imágenes que se corresponden con un mismo lugar del espacio, sin necesidad de reconocer objetos ni sus partes. En los estereogramas de puntos aleatorios, los puntos negros de cada imagen son todos idénticos; todos son de igual tamaño, forma y brillo. Cualquiera de ellos podría, en principio, quedar emparejado con uno cualquiera de un gran número de puntos de la otra imagen. Y no obstante, el cerebro logra resolver el dilema y elegir coherentemente el conjunto de emparejamientos correctos.

Forzosamente tiene para ello que valerse de algo más que de los puntos mismos. En particular, dado que es capaz de resolver el problema de la correspondencia, está claro que sabe sacar partido de un conjunto de presunciones implícitas concernientes al mundo visual, presunciones que limitan y restringen el problema de emparejamiento, haciéndolo así determinado y resoluble. En 1976, David Marr y el autor, trabajando en el MIT, descubrieron que ciertas propiedades sencillas de las superficies materiales podrían delimitar el problema lo suficiente para que los algoritmos (procedimientos a seguir por el ordenador) de estereopsis que estábamos entonces investigando pudieran abordarlo. Son éstas: primera, que un punto dado de una superficie material tiene solamente una localización tridimensional en cada instante dado; y, segunda, que los objetos físicos son cohesivos y, por lo general, opacos, en cuya virtud la variación de profundidad sobre las superficies es, por lo común, suave, presentando cambios bruscos tan sólo a lo largo de sus

contornos. La primera de estas restricciones –la unicidad de localización– significa que cada elemento de una y otra imagen (cada punto de un estereograma aleatorio, pongamos por caso) tiene una disparidad específica y única, y tan sólo puede emparejarse con un elemento bien determinado de la otra imagen. La segunda restricción –continuidad y opacidad– significa que la disparidad ha de variar sin brusquedad, salvo en los contornos del objeto.

Tomadas en conjunción, estas dos restricciones generan reglas de emparejamiento razonables y potentes. Más adelante describiré algunas reglas sencillas. Sin embargo, es necesario especificar antes los elementos o rasgos que deben quedar emparejados. Después de todo, el mundo visual no es un estereograma de puntos aleatorios, formado exclusivamente por puntos blancos y negros. Ya hemos visto que los valores de intensidad son, con mucho, poco de fiar. Y no obstante, la información requerida por el cerebro se encuentra "en clave", por así decirlo, contenida en la matriz de intensidades que proporcionan los fotorreceptores. El problema se simplifica apelando a una tercera propiedad de las superficies materiales. Su fundamento es la observación de que, allí donde la superficie presenta cambios de carácter físico, muestra, por lo común, nítidas alteraciones de intensidad reflejada. Estas variaciones (provocadas por marcas sobre la superficie o por variaciones de su profundidad) podrían servir de caracteres de emparejamiento más dignos de confianza que lo serían los meros valores de la intensidad.

Por consiguiente, en lugar de valores numéricos de las intensidades, se busca una representación más simbólica, más compacta y robusta, del mundo visual, es decir, una representación en la cual los símbolos primitivos –los signos en que se encuentra codificado el mundo visual– son las variaciones de intensidad. Marr lo bautizó "el boceto primario". Consiste, en esencia, en la conversión de las matrices de intensidades de gris que proporcionan los fotorreceptores visuales, dándoles una forma que haga explícita la posición, dirección, escala y magnitud de los gradientes significativos de intensidad luminosa, gracias a los cuales el módulo de estereopsis situado en el cerebro puede resolver el problema de correspondencia y reconstruir la geometría tridimensional del mundo visible. Procederé a describir un esquema que hemos venido utilizando durante estos últimos años en el Laboratorio de Inteligencia Artificial, y que se funda en ideas nuevas y viejas puestas a punto por cierto número de investigadores: Marr, Ellen C. Hildreth y el autor, fundamentalmente. Tiene algunos rasgos atractivos: es francamente sencillo, funciona bien y presenta interesantes semejanzas con la visión biológica, que fue, a fin de cuentas, la que nos lo sugirió. No es, empero, la solución completa. Tal vez lo mejor sea considerarlo a modo de hipótesis de trabajo acerca de la visión.



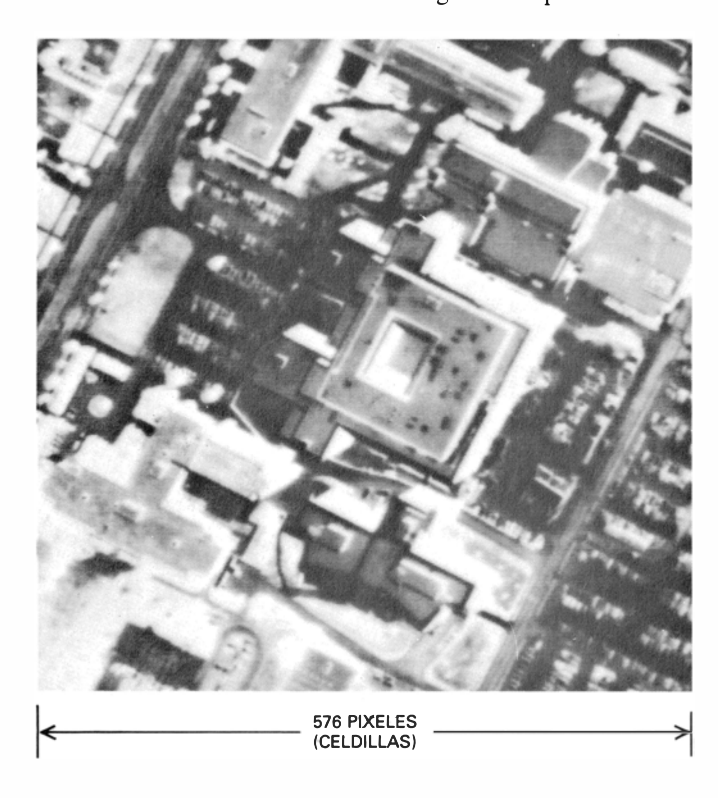
6. DERIVADAS ESPACIALES de una imagen. Sirven para resaltar sus variaciones espaciales de intensidad. La parte izquierda de la ilustración nos muestra una divisoria entre dos tonos uniformes de gris (*a*). Bajo ella vemos la gráfica de intensidad luminosa a lo largo de un camino que cruza la divisoria (*b*). La derivada primera de la intensidad es la razón, o tasa, con que cambia (*c*). En los extremos derecho e izquierdo no hay cambio; la derivada primera es, por tanto, igual a cero. Al atravesar la divisoria, la tasa de variación se eleva, y luego decae. La derivada segunda de la intensidad es la tasa de variación de la tasa de variación de la intensidad (*d*). Ambas derivadas hacen resaltar la divisoria. La primera lo señala con un pico; la segunda lo hace tomando en ella el valor cero. La parte derecha de la ilustración nos presenta un borde más típico del mundo visual real (*a'*). El correspondiente perfil de intensidades (*b'*) y de sus derivadas (*c'*, *d'*) están afectadas de "ruido". Es preciso "alisar" el borde antes de tomar derivadas. Esta ilustración, y la figura 2, las preparó H. Keith Nishihara, del Laboratorio de Inteligencia Artificial.

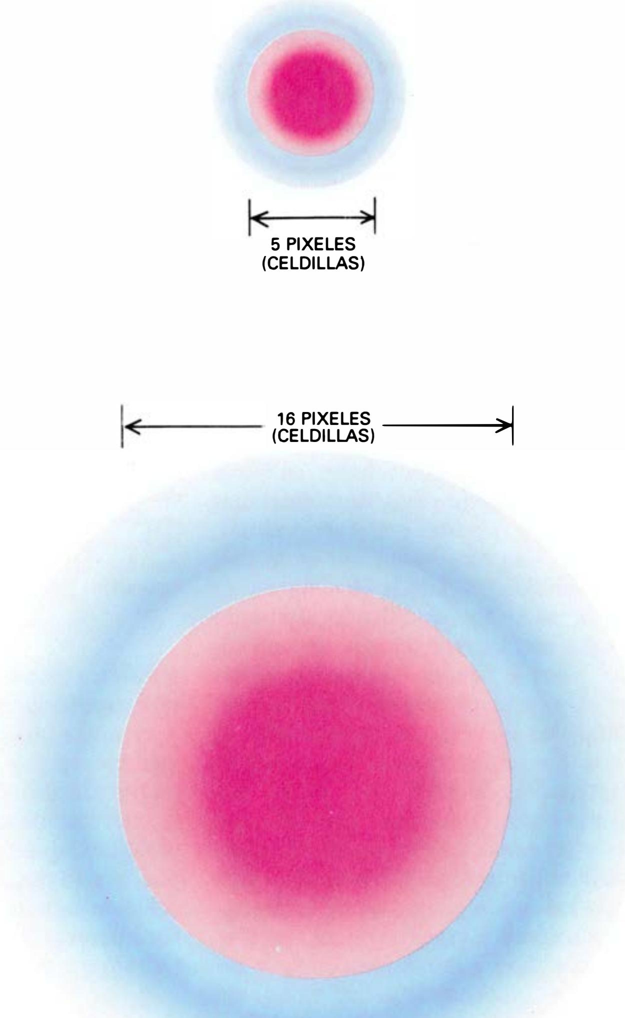
En esencia, para detectar los cambios de intensidad de una imagen lo que se hace es comparar los valores correspondientes a puntos vecinos. Cuando la diferencia sea grande, la intensidad variará rápidamente. Desde el punto de vista matemático, el proceso equivale a tomar la derivada primera. (La derivada primera de una función matemática da la medida de su tasa de variación. Aquí es, sencillamente, la razón con que la intensidad cambia en cada punto de un camino trazado sobre la matriz de niveles de gris.) La posición de los valores extremos, sean picos o pozos, de la derivada primera permite localizar francamente bien la posición de las aristas o líneas divisorias de intensidad [*véase la figura 6*]. Es frecuente, a su vez, que la divisoria de intensidades corresponda a una arista o borde de una superficie material. Tam-

bién la derivada segunda presta buenos servicios. La derivada segunda no es más que la tasa de variación de la tasa de variación, y se calcula tomando diferencias de valores vecinos de la derivada primera. Las divisorias de intensidad de la matriz de intensidades de gris corresponden a pasos por cero de la derivada segunda: lugares donde la derivada segunda toma el valor cero conforme va decreciendo desde valores positivos a negativos, o contrariamente.

Las derivadas parecen ofrecer resultados muy prometedores. Sin embargo, utilizadas por sí solas raramente funcionan bien con imágenes reales, a causa sobre todo de que pocas veces son las variaciones de intensidad de las imágenes reales variaciones nítidas. Para empezar, suele suceder que se superpongan muchos cambios de intensidad distintos, lentos unos, rápidos otros, sobre multitud de diferentes escalas espaciales. También es frecuente que las variaciones de intensidad sufran corrupciones por el análogo visual del ruido. Están corrompidas, con otras palabras, por perturbaciones de naturaleza aleatoria que se infiltran en distintas etapas, al tiempo que la imagen formada por el sistema óptico, ocular o de la cámara, se transduce en una matriz de mediciones de intensidad. Para poder habérselas con las divisorias afectadas por "ruido", como con los bordes correspondientes a distintas magnitudes de escala, es preciso "alisar" la imagen, para lo cual se calculan los promedios locales de los valores de intensidad en el entorno de cada punto. Hechas estas correcciones puede ya realizarse la operación de cálculo de diferencias, que equivale, en el fondo, a tomar las derivadas primera y segunda.

La secuencia de operaciones a efectuar puede concretarse en diversos procedimientos; se han realizado grandes esfuerzos para dar con métodos óptimos. En uno de los más sencillos, las dos operaciones –alisamiento y derivación– se han articulado en un solo proceso. La terminología técnica nos lo hace parecer imponente: es preciso efectuar una convolución de la imagen

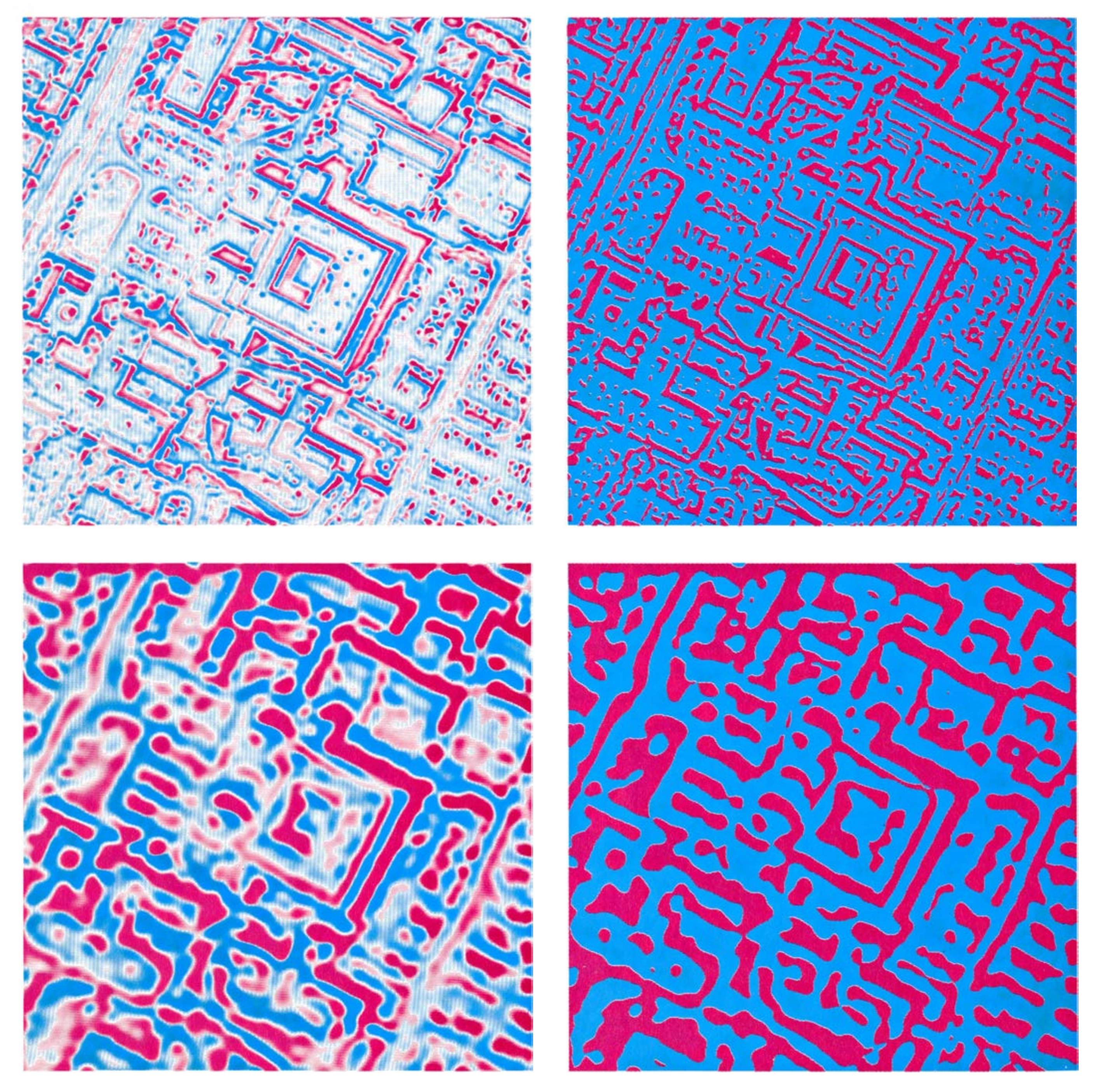




7. FILTRADO CENTRO-ENTORNO de una imagen, que sirve para alisarla y tomar su segunda derivada espacial. Tenemos aquí, a la izquierda, una imagen. Se muestran después filtros de dos tamaños. Los "filtros" son en realidad procesos computacionales. Concretamente, la medida de intensidad de cada punto se sustituye por un promedio ponderado de las medidas circundantes. Las medidas tomadas en los puntos circundantes más cercanos contribuyen al promedio con pesos positivos; por tanto, el centro del filtro es "excitador" (*rojo*). Viene después una corona circular donde las medidas contribuyen con pesos negativos; por tanto, el "entorno" del filtro es "inhibidor" (*azul*). La tercera parte de la ilustración muestra los mapas producidos por los filtros. Ya no son tablas de intensidades de gris. Para empezar, los mapas contienen valores positivos y negativos (*rojo y azul, respectivamente*). Son mapas de la segunda derivada. Las transiciones de uno a otro color corresponden a anulaciones, o pasos por cero, de esta derivada, y señalan los lugares de la imagen original donde su intensidad variaba con rapidez máxima. Los mapas de la derecha de la ilustración hacen resaltar las anulaciones, mostrando únicamente regiones positivas (*en rojo*) y regiones negativas (*en azul*).

con un filtro que incorpora una función especial cuyas variables son un punto y su entorno, función conocida por "laplaciana de una gaussiana". No es tan terrible como suena. Las gaussianas bidimensionales son las conocidas distribuciones acampanadas, tan habituales en estadística. En nuestro contexto, la gaussiana especifica qué importancia debe asignársele al entorno de cada *pixel* (celdilla), o elemento de imagen, cuando se proceda a alisarla. Tal importancia ha de disminuir conforme aumenta la distancia. La laplaciana es una derivada de segundo orden que pondera por igual todos los caminos que parten de un punto. La laplaciana de una gaussiana convierte la superficie acampanada en algo más semejante a un sombrero mexicano. La campana se estrecha, y, por su pie, se forma una depresión negativa.

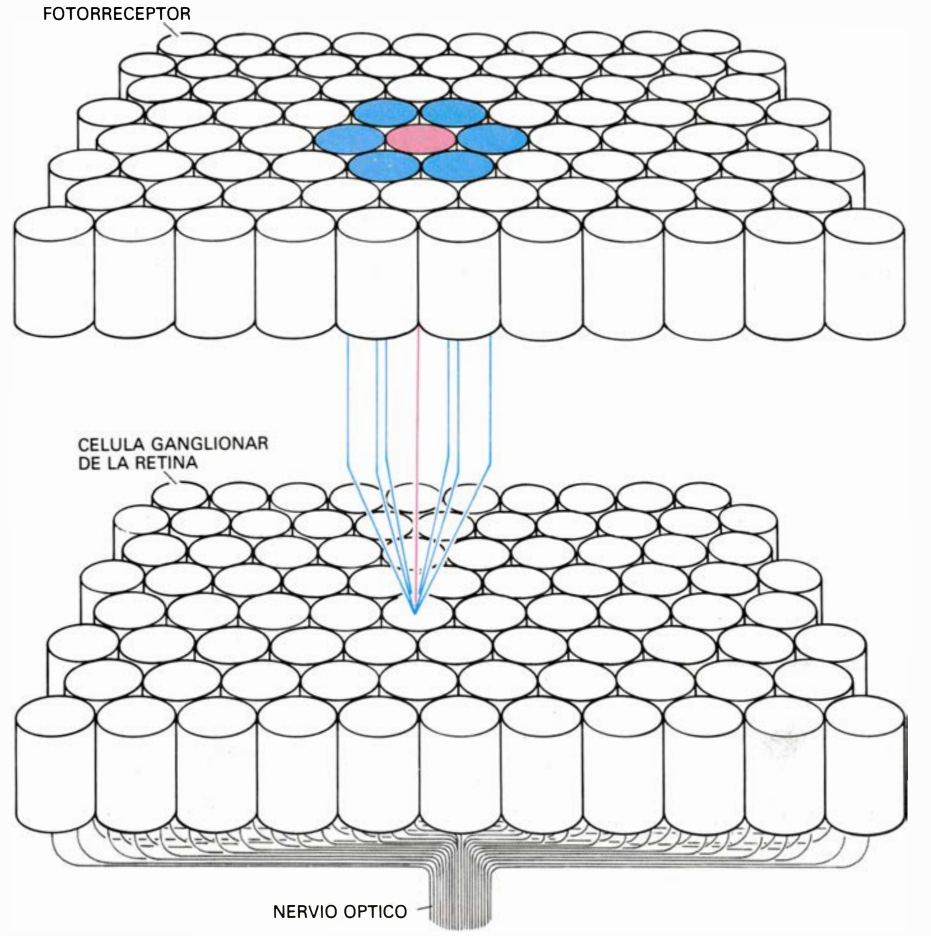
Estamos ahora en condiciones de describir el procedimiento sin recurrir al vocabulario técnico. La convolución de la imagen con el filtro que comporta la laplaciana de una gaussiana equivale a sustituir cada *pixel* de la imagen por un promedio ponderado de los elementos de imagen vecinos; la laplaciana de la gaussiana es la encargada de la asignación de pesos. He aquí como actúa el filtro en cada *pixel*. El filtro le asigna al *pixel* el máximo peso positivo, y pesos positivos decrecientes, en función de la distancia, a los *pixeles* más cercanos [*véase la figura 7*]. Viene seguidamente una corona circular -un anillo- sobre la cual se asigna a los *pixeles* pesos negativos. Por tanto, los puntos brillantes de esa corona aportarán al promedio intensidades de valor negativo. El resultado del filtraje global es una tabla de números positivos y negativos, una especie de derivada segunda de la intensidad de la imagen, calculada a la escala del filtro. Los lugares de paso por cero que encontremos en esta tabla se corresponden con lugares de la imagen donde la intensidad varía más rápidamente. Observemos que un mapa binario (que mostrase solamente dos valores) que se limitase a recoger



las regiones positivas y negativas de la tabla tras efectuar la operación de filtrado sería, en esencia, equivalente a un mapa de pasos por cero, pues cada uno de esos mapas podría construirse a partir del otro.

Según parece, en el cerebro humano se dan casi todos los dispositivos necesarios para efectuar un filtrado semejante. En 1865, Ernst Mach hacía notar que la percepción visual parecía amplificar las variaciones espaciales de intensidad luminosa. Mach postulaba que tal amplificación pudiera deberse al fenómeno de inhibición lateral, mecanismo cerebral por el que, al excitarse una fibra nerviosa –un axón– por un punto luminoso brillante de la escena visual, quedaba bloqueada la excitación de los axones vecinos. Como es obvio, esta operación magnifica el contraste entre el punto brillante y sus alrededores; se asemeja, pues, a una derivada espacial.

En las décadas de 1950 y 1960 fueron acumulándose pruebas que inducían a pensar que la retina efectuaba algo muy semejante a un filtrado centro-entorno. Las señales emanadas de cada retina se transportan hasta el resto del cerebro por haces de alrededor de un millón de fibras nerviosas, cada una de las cuales es el axón de una de las neuronas llamadas células ganglio-retinales. Estas células extraen sus señales de entrada (auxiliadas por neuronas intermediarias) de las enviadas por un grupo de fotorreceptores, que constituyen un "campo receptor". Lo que las pruebas sugieren es que, para ciertas células ganglionares, el campo receptor tiene una organización centro-entorno cuyo comportamiento se aproxima a la laplaciana de una gaussiana. El brillo recibido en el centro del campo excita la célula ganglionar; el brillo recibido por una corona circundante la inhibe. En breve, el campo receptor consta de un centro excitador y de un entorno inhibidor (el sombrero mexicano, elevado en el centro, deprimido en el contorno).



8. FILTRO BIOLOGICO implantado en la retina, comparable a la rutina de ordenador explicada en la figura anterior. Comienza con una capa de fotorreceptores, que miden la intensidad del mundo visual. Están conectados por neuronas intermediarias (no dibujadas en el diagrama) a un estrato de células ganglionares de la retina, encargadas de retransmitir datos a centros visuales superiores del cerebro. Por sencillez, sólo se ha dibujado uno de tales grupos de conexiones. Una célula fotorreceptora (*rojo*) estimula una célula ganglionar, facilitando su tendencia a generar señales nerviosas; los fotorreceptores circundantes (*azul*) inhiben la célula ganglionar. Tal disposición equivale a un filtrado centro-entorno biológico.

Otras células ganglionares tienen propiedades contrarias: son inhibidas desde el centro del campo receptor y excitadas desde su contorno. Si los axones pudieran transmitir señales indicadoras de valores negativos, tales células ganglionares estarían de más, pues se limitan a informar de la negación de lo transmitido por las células de excitación central. Sin embargo, las neuronas no pueden retransmitir fácilmente actividad negativa; las encargadas de transmitir información binaria (información del tipo "todo o nada") sólo pueden encontrarse en actividad o en quiescencia. La naturaleza pudiera, pues, precisar de opuestos neuronales. Los valores positivos de una imagen sometida a un filtrado de tipo centro-entorno pudieran quedar representados por la actividad de células excitables desde el centro; los valores negativos, por la actividad de las inhibidas desde el centro. A este respecto no puedo abstenerme de mencionar que las células ganglionares excitadas desde el centro y las inhibidas se encuentran en diferentes estratos, al menos en la retina del gato. Así, los mapas generados por nuestro ordenador quizá describan muy al pie de la letra la actividad neuronal. En los de la figura 7, el rojo pudiera corresponder a actividad del estrato excitable y, el azul, a actividad del estrato inhibido. Los pasos por cero (esto es, las transiciones de uno a otro color) serían lugares donde la actividad se conmuta de una a otra capa. He aquí, por tanto, una conjetura que encadena la teoría computacional de la visión con los mecanismos cerebrales puestos al servicio de la visión biológica.

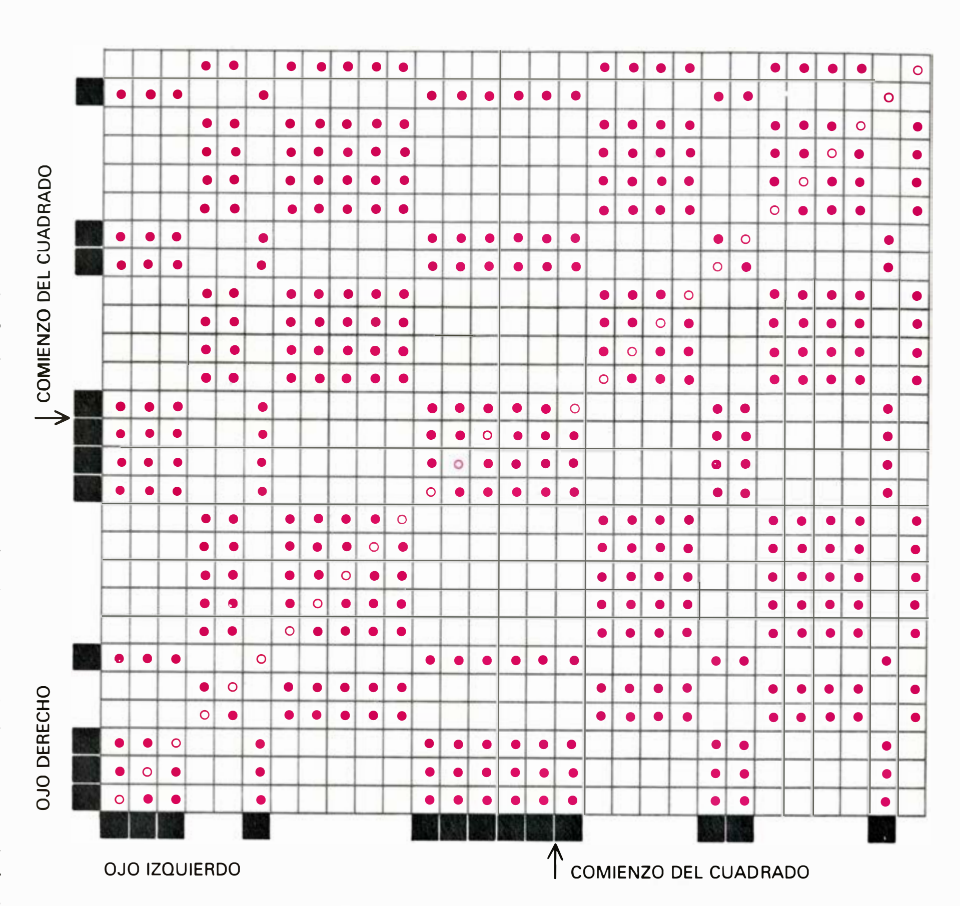
Es preciso añadir que el proceso de filtrado centro-entorno de una imagen es, computacionalmente, muy dispendiosa para el ordenador, porque requiere una cifra altísima de multiplicaciones: alrededor de mil millones para imágenes de 1000 *pixeles* (celdillas) por 1000. En el Laboratorio de Inteligencia Artificial, H. Keith Nishihara y Noble G. Larson, Jr., han diseñado un dispositivo especial, un "convolucionador", capaz de efectuar la operación completa más o menos en un segundo. Sin menoscabo de su impresionante velocidad, es una tortuga comparada con la de las células ganglionares de la retina.

Convendría tocar también el problema de la escala espacial. Los cambios de intensidad de las imágenes pueden ser finos o groseros. Es preciso detectar y representar todos. ¿Cómo hacerlo? La solución natural (que es la su-

gerida por la fisiología y la psicofísica) consiste en utilizar filtros centro-entorno de diferentes tamaños. Tales filtros son del tipo pasabanda: su respuesta es óptima para cierta banda o gama de frecuencias espaciales. Con otras palabras, el filtro solamente "ve" los cambios de intensidad que se producen de *pixel* a *pixel* si los cambios no son ni demasiado lentos ni demasiado bruscos. Por tanto, dada una escala espacial, el proceso de hallar las variaciones de intensidad consiste en filtrar la imagen con un filtro centro-entorno (o un campo receptivo) de un tamaño particular, y hallar seguidamente los pasos por cero de la imagen así filtrada. Dada una combinación de escalas, es necesario disponer de un juego de filtros de los distintos tamaños, que efectúan en cada escala el mismo cómputo. Los filtros grandes detectarían entonces los bordes difusos o suaves, así como las variaciones de iluminación de carácter global; los filtros menores detectarían detalles cada vez más finos. Los bordes nítidos se detectarían a todas las escalas.

Recientes resultados teóricos refuerzan los atractivos de esta idea, por mostrar que una imagen filtrada contiene rasgos similares a los pasos por cero, ricos en información. Para empezar, Ben Logan, de Bell Laboratories, ha demostrado que una señal unidimensional, filtrada según cierta clase de filtros, puede reconstruirse exclusivamente a partir de los pasos por cero. La laplaciana de una gaussiana no satisface exactamente las condiciones de Logan. Su trabajo sugiere, empero, que los símbolos primitivos que los ceros proporcionan son potentes símbolos visuales. Más recientemente, Alan Yuille y el autor han realizado un estudio teórico del filtrado centro-entorno, y han podido demostrar que los mapas de paso por cero obtenidos a distintas escalas pueden representar completamente, es decir, sin pérdida de información, la imagen original.

No queremos con eso afirmar que el esquema de codificación basado en los puntos de anulación sea el óptimo para procesos tales como la estereopsis. Ni tampoco pretendemos insistir en que la base de la visión biológica resida exclusivamente en la detección de puntos de anulación. Sí son, los lugares de paso por cero, candidatos a tal esquema óptimo de codificación; ellos (o algo semejante) pudieran ser importantes elementos a emparejar de entre los componentes de las dos imágenes retinianas. Tenemos ahí una posible respuesta



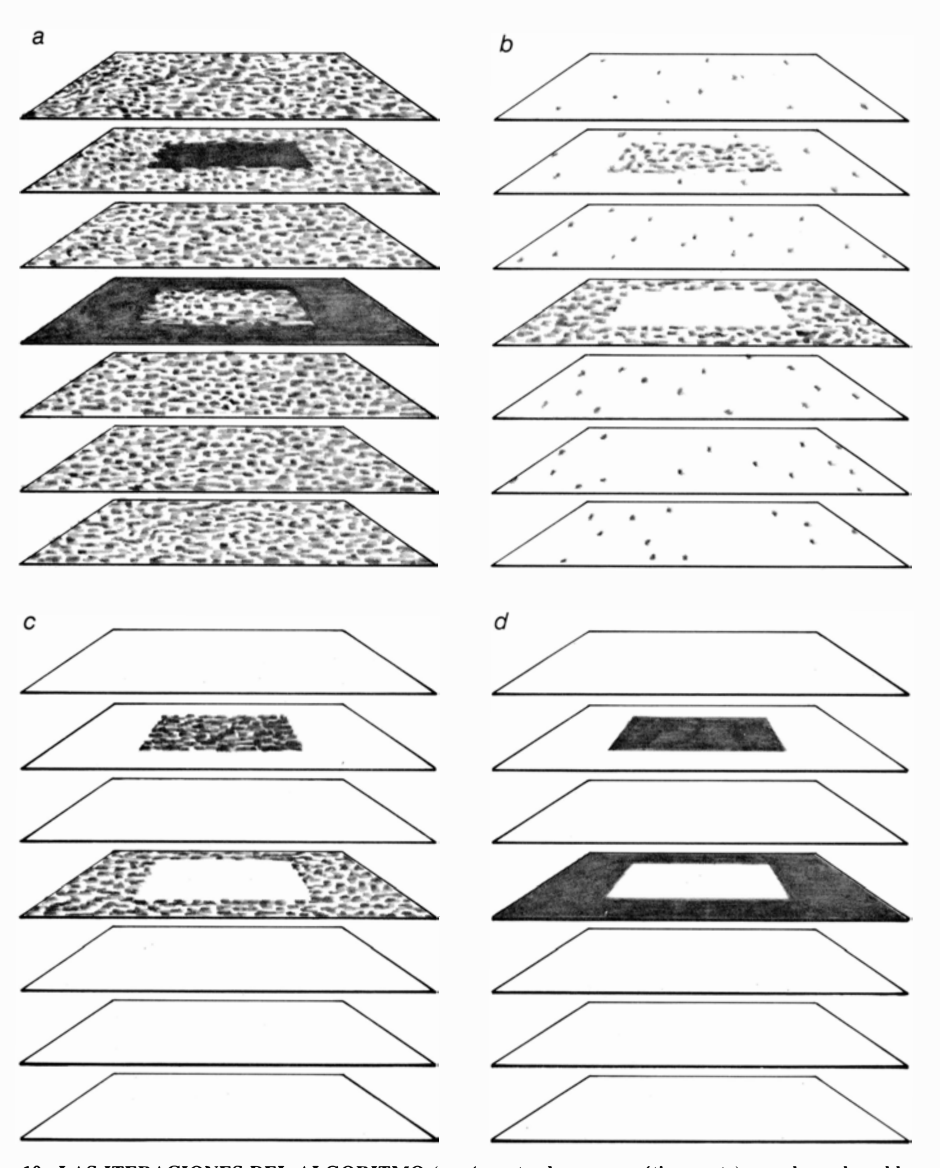
9. ALGORITMO DE ESTEREOPSIS ideado por Marr y el autor, que reconstruye el mundo tridimensional buscando emparejamientos de puntos situados en las filas homólogas de un par de estereogramas de puntos aleatorios. Vemos en lo alto de la ilustración dos de tales hileras (*blanco y negro*). Bajo ellas tenemos las hileras dispuestas según unos ejes de coordenadas. Las filas horizontales del diagrama representan ahora las visuales del ojo derecho; las columnas, verticales, son las visuales del ojo izquierdo. Los puntos rojos señalan todas las intersecciones en las que ambos ojos ven un punto negro o un punto blanco. El problema está claro: un punto negro dado de uno de los estereogramas podría en principio estar emparejado con cualquiera de los puntos negros del otro. Lo mismo podemos decir de los puntos blancos. Empero, sólo algunos de estos emparejamientos son correctos (*círculos rojos vacíos*); esto es, solamente algunos emparejamientos revelan que un cuadrado de textura de puntos aleatorios tiene disparidad binocular. La explicación del algoritmo continúa en la figura 10. (Los dibujos son obra de Ian Worpole.)

a la cuestión de qué es lo que el módulo de estereopsis pone en correspondencia. Tenemos, además, el comienzo de una teoría computacional que pudiera llegar a dar precisión matemática a la vaga noción de "borde", y la conectara con propiedades conocidas de la visión biológica, tales como la prominencia de las células "detectoras de bordes" descubiertas en la Facultad de Medicina de Harvard por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel en la zona del córtex cerebral a donde llegan los datos visuales.

En resumen, una combinación de consideraciones de carácter computacional y de datos biológicos hace pensar que un primer e importante paso hacia la estereopsis y otros procesos visuales consiste en la detección y señalización de cambios de intensidad de las imágenes, analizados a distintas escalas espaciales. Una forma de conseguirlo es mediante la laplaciana de una gaussiana; los pasos por cero de la tabla de valores filtrados se corresponden entonces con líneas divisorias de intensidad de la imagen. Una información análoga se encuentra implícita en la actividad de las células ganglionares centralmente excitadas o inhibidas. Para representar explícitamente los pasos por cero (si es que realmente el cerebro hace algo de ese estilo), una clase de neuronas detectoras de bordes habría de realizar operaciones específicas sobre la salida de las células centralmente excitadas o inhibidas que se encuentran en capas vecinas en la retina. Sin embargo, nos

tropezamos aquí con la carencia de información acerca de cuáles sean los cálculos que las células nerviosas pueden desarrollar con facilidad.

Estamos ahora en situación de ver cómo una representación de cambios de intensidad podría utilizarse para la estereopsis. Examinemos primero un algoritmo ideado por Marr y el autor, que satisface los requisitos exigidos antes; a saber: unicidad (un punto dado de una superficie material tiene una única localización espacial, por lo que solamente podrá ser correcto uno de los emparejamientos) y continuidad (las variaciones en profundidad son suaves, por lo general, por lo que las disparidades binoculares tienden a variar suavemente). El algoritmo resuelve con éxito los estereogramas de puntos aleatorios, y al menos algunas imágenes naturales. Se efectúa en un ordenador; así pues, su ejecución real se reduce a una sucesión de cálculos. Puede imaginarse, no obstante, que establece una red tridimensional de nodos, que representan las posibles intersecciones de rayos visuales emanados de los ojos, que se cortan en el mundo tridimensional. La condición de unicidad se lleva a la práctica exigiendo que los nodos de cada visual determinada se inhiban unos a otros. Mientras tanto, el requisito de continuidad será puesto en práctica exigiendo que cada nodo excite a sus vecinos. En el caso de estereogramas de puntos aleatorios, el procedimiento será relativamente sencillo. En tal caso, las parejas de *pixeles* (celdillas) de cada línea horizontal de un estereograma habrán de buscarse solamente a lo largo de la correspondiente fila del otro estereograma.



10. LAS ITERACIONES DEL ALGORITMO (aquí mostradas esquemáticamente) **resuelven el problema de la estereopsis. El algoritmo le asigna valor 1 a todas las intersecciones de visuales señaladas por una coincidencia. A las restantes se les asigna un valor de 0. Seguidamente el algoritmo calcula una suma ponderada para cada intersección. En el mundo tridimensional, la profundidad de las superficies tiende a variar suavemente; por tanto, las intersecciones colindantes que tengan asignado valor 1 contribuyen a la suma positivamente. Los ojos ven solamente una superficie en cada visual dada; por consiguiente, las intersecciones con valor de 1 situadas en una misma visual aportan pesos negativos. Cuando la suma ponderada excede de un cierto umbral determinado, a la intersección se le asigna valor 1; si no, se pone a 0. Tras unas cuantas iteraciones de esta rutina, se completa el cálculo: los estereogramas se han decodificado. Pueden procesarse de modo análogo imágenes naturales previamente transformadas en tablas binarias (es decir, mapas bi-valorados de pasos por cero) mediante el proceso de filtrado centro-entorno.**

El algoritmo comienza asignando el valor 1 a todos los nodos que representen la coincidencia binocular entre dos *pixeles* blancos o dos *pixeles* negros del par de estereogramas. A los restantes nodos se les da valor 0. Los 1 señalan así todas las coincidencias, sean auténticas o falsas [*véase la figura 9*]. A continuación, el algoritmo efectúa una suma algebraica para cada nodo. En ella, los nodos vecinos que han recibido el valor 1 aportan pesos positivos; los nodos de valor 1 situados a lo largo de rayos visuales contribuyen negativamente. Cuando el resultado supera cierto valor umbral, se le da al nodo el valor 1; en caso contrario, se le asigna valor 0. Tenemos ejecutado así el primer paso de iteración del algoritmo. Al cabo de unas cuantas iteraciones de éstas, la red se estabiliza. El problema de estereopsis está resuelto.

El algoritmo explicado tiene algunas grandes virtudes. Es un algoritmo cooperativo, consistente en cálculos de carácter local, que un gran número de procesadores sencillos podrían ejecutar asincrónicamente y en paralelo. Son los cálculos del tipo que uno imagina pueden realizar las neuronas. El algoritmo es, además, capaz de rellenar lagunas en los datos, es decir, interpolar en superficies continuas. Al mismo tiempo, consiente que se den discontinuidades bruscas. Por el contrario, la red necesaria para procesar imágenes naturales finamente detalladas tendría que ser extraordinariamente grande, con la agravante de que casi todos los nodos de la red se encontrarían inactivos en cada instante dado. Además, los valores de intensidad no resultan satisfactorios para procesar imágenes más naturales que un diagrama de puntos aleatorios.

La eficacia del algoritmo puede ampliarse, logrando que alcance para analizar al menos ciertas imágenes naturales si éstas se filtran antes para obtener el signo de su convolución con la laplaciana de una gaussiana. Los mapas binarios resultantes pueden servir entonces como datos de entrada para el algo-

ritmo cooperativo. Los propios mapas resultan intrigantes. En los generados por filtros gruesos, cuya resolución espacial es, correspondientemente, baja, los pasos por cero de un signo dado (los pasos, por ejemplo, en los que el signo de la convolución cambia de positivo a negativo) raramente se presentan, y jamás en mutua proximidad. Por consiguiente, los falsos objetivos (emparejamientos entre anulaciones no correspondientes de un par de estereogramas) se hallan ausentes sobre una amplia gama de disparidades.

Lo cual hace pensar en una clase diferente de algoritmos de estereopsis. Uno de tales algoritmos, recientemente desarrollado por Nishihara para instalarlo en robots, empareja manchas positivas y negativas de pares de imágenes filtradas. Otro algoritmo, anteriormente desarrollado por Marr y el autor, empareja pasos por cero del mismo signo en pares de imágenes creadas por filtros de dos o tres tamaños. Se emparejan primero las imágenes más groseramente filtradas, midiéndose sus disparidades binoculares. Los resultados se utilizan para representar aproximadamente las imágenes. (Podrían utilizarse también características que subsistan en la visión monocular, como la textura, por ejemplo.) Las imágenes obtenidas por el filtrado intermedio se someten a un proceso similar. Finalmente, el proceso se aplica a las imágenes de filtrado más fino. Para entonces ya se conocen con detalle las disparidades binoculares del par estereoscópico; el problema de la estereopsis queda reducido al trigonométrico.

Una generalización teórica, así como su puesta en práctica, que de nuestro algoritmo ha realizado W. Eric L. Grimson, en el Laboratorio de Inteligencia Artificial, funciona muy bien en una de las aplicaciones más típicas de los sistemas estereoscópicos, el análisis de fotografías aéreas. Además, el algoritmo de Grimson remeda muchas de las propiedades de la percepción de la profundidad de los humanos. Por ejemplo, funciona con éxito aunque una de las imágenes estereoscópicas esté desenfocada. Puede haber, empero, muchas diferencias sutiles. Recientes trabajos de John Mayhew y John P. Frisby, de la Universidad de Sheffield, y de Julesz, en los Bell Laboratories, deberían esclarecer la cuestión.

¿Qué podemos decir de la estereopsis biológica? Los algoritmos que acabo de describir se encuentran lejos de resolver el problema de la correspondencia con la eficacia que nuestro cerebro lo consigue. Sugieren, no obstante, cómo se resuelve el problema. Mientras tanto, investigaciones relativas al córtex visual del gato y del macaco han puesto de manifiesto que ciertas neuronas corticales se encargan de señalar disparidades binoculares. Y, muy recientemente, Gian F. Poggio, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, ha descubierto neuronas corticales que señalan la disparidad binocular correcta en estereogramas de puntos aleatorios, donde hay muchos falsos emparejamientos. Su descubrimiento, junto con el análisis computacional de la estereopsis realizado por nosotros, promete facilitar la comprensión de los mecanismos subyacentes a la percepción de la profundidad.

Debería aflorar claramente un mensaje, a saber, la medida en que pueden conjuntarse cerebro y ordenador para estudiar problemas como el de la visión. El ordenador, por una parte, es instrumento muy potente con el que someter a prueba algoritmos y teorías computacionales. En el proceso, guía e inspira el diseño de experimentos neurofisiológicos, sugiere qué es lo que debe buscarse en el cerebro. El impulso que por esta razón recibirá la investigación del cerebro habrá sin duda de ser grande en las décadas venideras.

Mas los beneficios no irán solamente en una dirección; también saldrán ganadoras las ciencias de cómputo. No faltan especialistas en computabilidad que sostengan que el cerebro tan sólo nos proporciona demostraciones de existencia, es decir, la prueba viva de que ciertos problemas admiten solución. El cerebro puede hacer más: puede mostrarnos cómo buscar soluciones. El cerebro es un procesador de información que ha evolucionado a lo largo de muchos millones de años, y que ha logrado ejecutar ciertas tareas superlativamente bien. Si lo consideramos, con justificada modestia, como instrumento incierto, la razón es, sencillamente, que tendemos a ser más conscientes de lo que hace menos bien, las cosas más recientes de la historia de la evolución, tales como el pensamiento lógico, matemático o filosófico, al tiempo que propendemos a ser totalmente inconscientes de sus auténticas facultades, como la visión. Es en estos dominios donde tenemos mucho que aprender del cerebro, y donde deberíamos juzgar nuestros logros en informática o robótica. Tal vez comencemos entonces a ver cuán vasto es el potencial que hay por delante.

Base molecular de la forma animal

Durante el desarrollo aparecen moléculas que median la adhesión intercelular. Tal vez regulen los movimientos de las células y la situación de los tejidos que determinan la morfología del embrión y la formación de los órganos

Gerald M. Edelman

El crecimiento organizado que experimenta un embrión, de mero cigoto a adulto funcional, ha fascinado siempre a cuantos se han interesado por el estudio de la vida. Aunque los acontecimientos sucesivos del desarrollo embrionario de muchas especies se han descrito en detalle, la cuestión fundamental de la embriología sigue constituyendo un reto para los más avanzados recursos de la moderna biología: ¿Qué controla el proceso de morfogénesis, esto es, el origen de la forma? En otras palabras, ¿cómo un código genético unidimensional puede, en último término, determinar un organismo tridimensional?

La pregunta habrá de hallar respuesta en el nivel molecular, pero probablemente no se dé con ella por la simple aplicación directa de los métodos de la biología molecular. Los procesos básicos del desarrollo (división, movimiento, adhesión, diferenciación y muerte de las células) desafían los análisis que se presentan en listas de genes e interacciones lineales de sus productos proteicos. Cada uno de esos procesos es el resultado de miríadas de episodios moleculares, regulados, en paralelo, por los genes implicados y por acontecimientos epigenéticos concomitantes (los no determinados directamente por genes concretos). Dada la naturaleza microscópica de esos acontecimientos, y su notable complejidad, no es de extrañar que se carezca de una teoría del desarrollo adecuada, del estilo de las que existen para explicar la genética y la evolución. Construirla constituye un reto especialmente obligado, pues determinar la naturaleza y regulación de las secuencias genéticas y epigenéticas del desarrollo embrionario y precisar sus implicaciones evolutivas quizá sea el más sobresaliente rompecabezas que le queda por resolver a la biología.

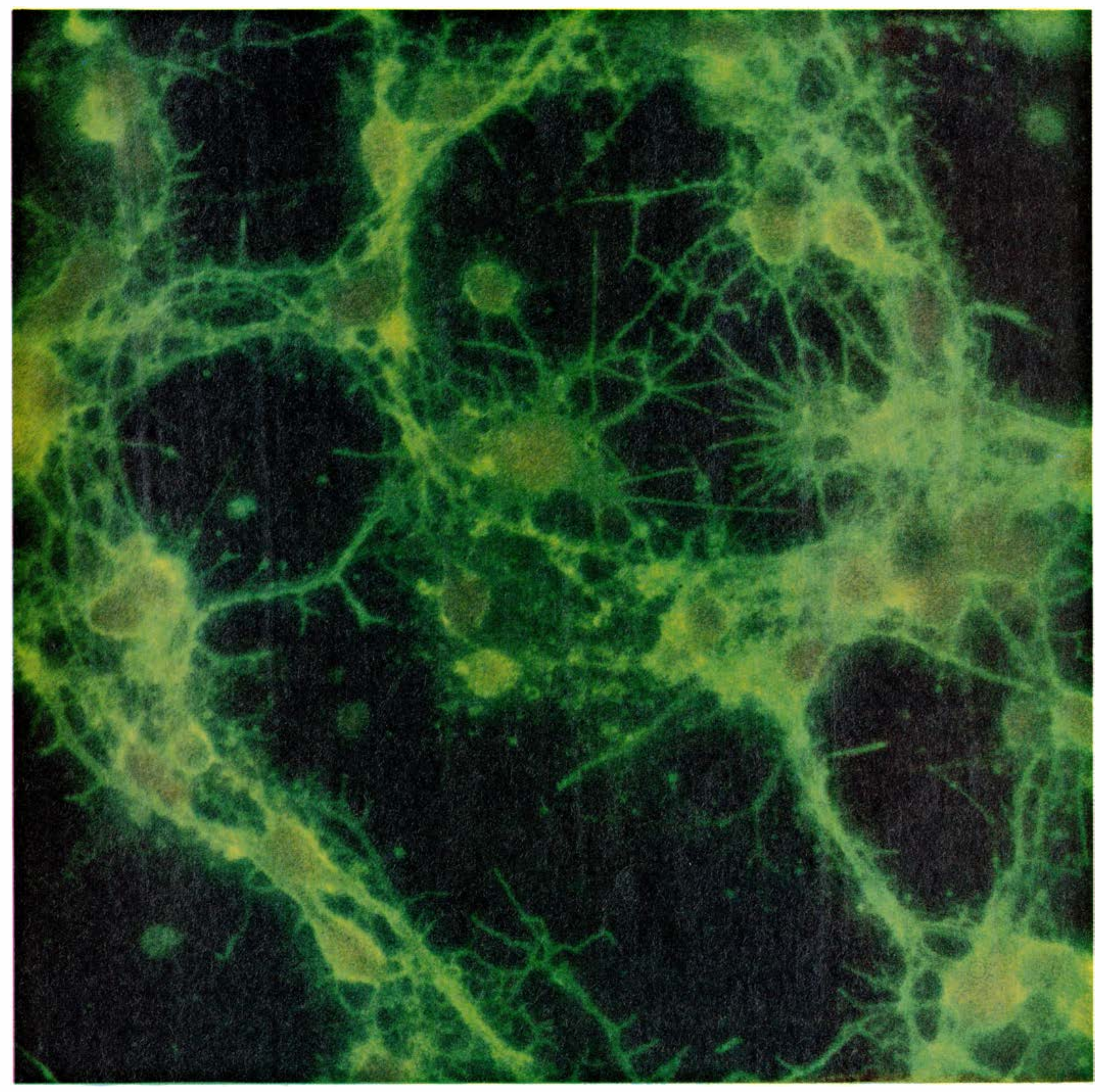
La resolución parcial del rompecabezas puede servirse del siguiente método: se elige un proceso elemental, se analiza en el nivel molecular y se relaciona luego el análisis con los demás procesos básicos de la morfogénesis. ¿Qué proceso del desarrollo escoger? Dependerá, hasta cierto punto, de si nos interesa la diferenciación de las células o la formación del patrón. La estrategia adoptada en nuestro laboratorio de la Universidad Rockefeller, donde nos hemos centrado en la formación del patrón, consiste en abordar con precisión el mecanismo de adhesión de las células. La adhesión celular debe producirse en todas las fases del desarrollo, pues es necesaria para establecer la forma, amén de constituir el proceso más susceptible al asalto químico directo. Se trata, además, del proceso que guarda una relación obvia con el mantenimiento de la forma final. La intervención de proteínas en la adhesión le confiere mayor atractivo. Las proteínas están determinadas directamente por el código genético, de modo que tanto el papel que desempeñen en el establecimiento de la forma embrionaria como el control a que estén sometidos sus genes podrán relacionarse dentro de un mismo sistema. Para determinar la forma embrionaria, habrá que esperar que se analicen todos los procesos básicos implicados, pero el trabajo sobre adhesión celular realizado a lo largo de los últimos diez años constituye ya un comienzo esperanzador; inspira fructíferas hipótesis, de las que cabe esperar la resolución final de ciertos aspectos de la morfogénesis.

Para centrar la naturaleza del problema revisemos brevemente algunos de los principales acontecimientos que se dan en fases tempranas del desarrollo del embrión de pollo. Poco después de la fecundación, una serie de divisiones celulares desemboca en la formación del blastodermo, un disco aplanado ubicado, en la membrana del huevo, por encima del vitelo. Las células de la parte superior del blastodermo constituyen el epiblasto, que da lugar a una capa subyacente denominada el hipoblasto y, más tarde, a otra intermedia, el mesoblasto. El episodio fundamental de la morfogénesis inicial es la formación, a partir de estas células precursoras, de las tres capas germinales del embrión: el ectodermo, el mesodermo y el endodermo. En este proceso, denominado gastrulación, se observa una sucesión precisa de movimientos celulares y de alteraciones de las capas de los tejidos. El propio epiblasto forma el ectodermo y, junto con partes del hipoblasto, el endodermo; el mesoblasto origina el mesodermo. En fases posteriores, el ectodermo, la capa más exterior del embrión, desarrolla el sistema nervioso y la piel. El endodermo da lugar a los pulmones, los intestinos y otros órganos. El mesodermo producirá los músculos, riñones y huesos.

El proceso de mayor trascendencia para todos los acontecimientos posteriores es el de la inducción embrionaria: las células que se diferencian para dar estructuras en una capa necesitan de la presencia de células con una historia diferente (de la misma o de otra capa); la aposición de células se consigue habitualmente por movimientos morfogenéticos. La inducción, o diferenciación dependiente del medio, empieza con la gastrulación. En el embrión es el producto de continuas secuencias de interacciones recíprocas entre diferentes grupos de células; se lleva a cabo, bien por contacto celular directo, bien por transferencia de factores moleculares. Entre las más precoces y decisivas de todas esas inducciones se cuenta la que transforma las células ectodérmicas en precursoras de tejidos nerviosos, como el cerebro y la médula espinal. Esta inducción primaria, o neural, depende de las interacciones entre el mesodermo y el ectodermo; culmina con la formación de la placa neural a partir del ectodermo. Más tarde, la placa neural sufre un conjunto

coordinado de pliegues (neurulación) hasta formar el tubo neural. Las distintas partes del mesodermo subyacente ejercen diferentes efectos en la determinación del cerebro anterior, cerebro medio, cerebro posterior y médula espinal. La inducción está especializada regionalmente, porque es el resultado de una secuencia, en el tiempo y en el espacio dentro del embrión cambiante, de señales estimuladoras o inhibidoras.

En los primeros momentos de la embriogénesis se distinguen ya algunos episodios morfogenéticos que reflejan los diversos procesos básicos: traslado de células endodérmicas hacia el interior del blastodermo durante la gastrulación, a través del surco denominado línea primitiva; segregación de células mesodérmicas para formar somitos, que son precursores segmentados de las estructuras musculares y esqueléticas, y agrupación de células ectodérmicas en elongación para formar las estructuras conocidas como placodas, que finalmente dan lugar a derivados especializados, como ganglios nerviosos y el cristalino. Organos endodérmicos complejos, como el hígado y el páncreas, se forman a partir del intestino endodérmico primitivo. Organos mesodérmicos como el riñón, con sus complejas estructuras tubulares, se forman después de una serie de inducciones recíprocas. Un proceso particularmente importante para que se produzcan las adecuadas aposiciones e inducciones de tejido es la conversión de láminas de células unidas (epitelios) en masas móviles de cé-



1. N-MAC, una molécula de adhesión celular asociada al tejido nervioso, se encuentra en los cuerpos celulares y las expansiones de neuronas de embriones de pollo, según se aprecia en esta micrografía de un cultivo celular tomada por Cheng-Ming Chuong, en el laboratorio del autor, y cuyo aumento es de 1200 diámetros. Las células se trataron con un anticuerpo anti-N-MAC marcado con el colorante fluoresceína, que emite un brillo verde bajo iluminación ultravioleta. El anticuerpo se ha unido a las MAC de todas las superficies celulares, incluyendo los conos de crecimiento: estructuras móviles espatuladas, situadas en los extremos de las prolongaciones neuronales en crecimiento, algunas de las cuales se distiguen con nitidez en el centro de la micrografía.

lulas laxamente organizadas (mesénquima); el proceso inverso reviste parejo interés en ciertas regiones embrionarias.

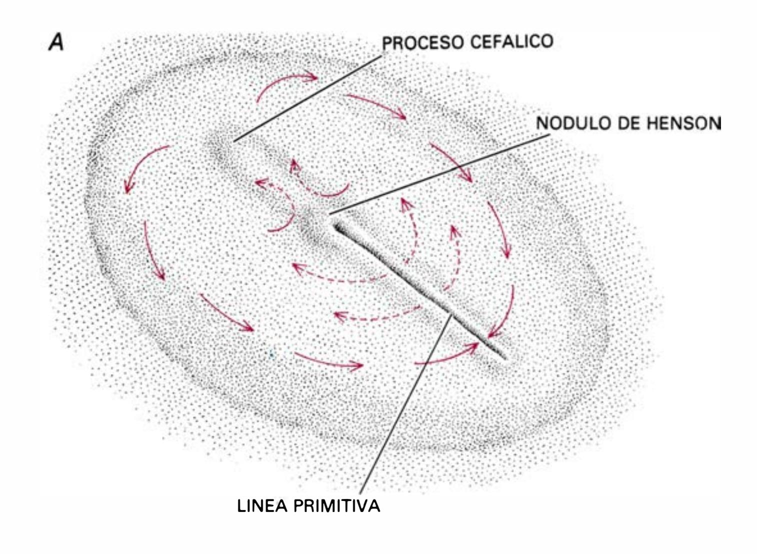
El desarrollo es de tipo histórico. La inducción primaria, así como la serie entera de inducciones secundarias que originan los órganos antes mencionados, dependen de la aposición de determinadas células que han atravesado cursos históricos diferentes. Esta extraordinaria serie de acontecimientos ocurre en una secuencia temporalmente bien definida y se organiza en fases, en cada una de las cuales se dan estructuras que servirán de base para las estructuras de las fases subsiguientes.

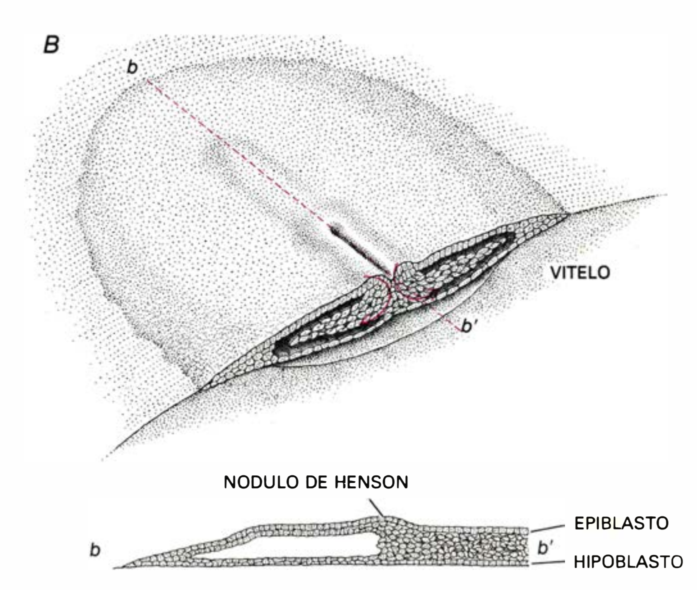
¿Cómo pueden traducirse al lenguaje molecular las descripciones clásicas de la morfogénesis? Nuestra estrategia ha sido, repetimos, la de buscar moléculas que mediaran la adhesión celular, el estudio de su estructura y el modo en que operan y la relación posterior de nuestros hallazgos con los acontecimientos fundamentales de otros procesos básicos del desarrollo. Antes de describir los resultados experimentales exploremos algunas ideas generales que relacionen la adhesión con el patrón; no se olvide que la formación del patrón es el tema central de la biología del desarrollo.

Dos son las vías en que los patrones podrían formarse en el nivel celular sin la intervención directa de ningún tipo de "pequeño arquitecto" o "demonio de la construcción". La primera consistiría en señalar de antemano todas las células con marcadores moleculares (proteínas, presumiblemente), de modo que cada uno fuera complemento espacial de otro marcador situado en una célula vecina del modelo. Así ocurrió, a grandes rasgos, con algunos elementos de la fábrica, mar adentro, de la gran abadía de Mont-Saint-Michel. En el continente, se talló la piedra y se le dio forma; marcaron las piezas los maestros canteros y se montaron en la isla según los planos. El modelo Mont-Saint-Michel viene a ser la metáfora de varias teorías de adhesión celular por "quimioafinidad". La mayor dificultad con que tropiezan este tipo de teorías estriba en que, si el modelo que hay que construir es complejo, se enfrenta con una amplia diversidad de formas o presenta muchos elementos y muchos detalles locales (como, por ejemplo, ocurre en el cerebro), entonces debe ser enorme el número de marcadores de superficie específicos que determinan la localización de cada célula. Puesto que tales marcadores serían, con toda probabilidad, proteínas específicas, cada una codificada por un gen distinto, el número de genes requerido sería inmenso. Además, un error de marcaje en una célula, cual piedra angular mal numerada, tendría consecuencias desastrosas. Por otra parte, tal modelo se encuentra prefigurado y es esencialmente estático: cuando los marcadores correctos se han unido, sobra todo dinamismo.

Vayamos con la otra vía, más dinámica, de generar modelos; la analogía, en esta alternativa, nos la ofrece un torrente de alta montaña. En esta situación cinética, lejos del equilibrio, el modelo resulta del juego de la energía, que se disipa al ambiente al superar diversos obstáculos. Formemos un caso simple de este modelo de torrente de alta montaña; imaginemos un curso de agua que desciende por la ladera y golpea un canto rodado sumergido, cuya temperatura está por debajo del punto de congelación. En un comienzo, el canto apenas incidirá en el curso de agua, que seguirá siendo único. Ahora bien, con el tiempo, al congelarse el agua sobre el canto rodado, la estructura en crecimiento puede convertirse de repente en una barrera que divida el torrente en dos, adoptando éste una nueva forma en su descenso por la montaña. Todas las formas subsiguientes del curso vendrán condicionadas por el efecto de la congelación inicial. Riachuelos torrente abajo pueden escindirse en múltiples e intrincados modelos al topar con diferentes obstáculos en cursos inferiores. Mas, visto desde arriba, el torrente tendrá, como un todo, una forma definida.

En un embrión, ¿hay que decirlo?, las cosas no son tan sencillas. Lo que no nos prohíbe imaginar que los equivalentes celulares de la fuerza que actúa en respuesta al potencial gravitatorio de la montaña sean los procesos de división, muerte y movimiento de las células. El equivalente de la congelación del agua sería la unión de unas células con otras mediante moléculas de adhesión celular (MAC), ubicadas en la superficie de aquéllas; la congelación total correspondería a una unión tan estrecha que ciertas células no pudieran ya separarse. Lo destacable de esta vía alternativa es que, para configurar cierto número de modelos celulares en un proceso análogo al ejemplo del torren-





2. PRINCIPALES EPISODIOS MORFOGENETICOS del desarrollo precoz del embrión de pollo: gastrulación (*A*, *B*) y neurulación (*C*, *D*). Al final de la gastrulación, las células de la capa superior del blastodermo convergen hacia el surco central (*flechas continuas*): la línea primitiva. Los movimientos de las células del mesoblasto (capa media) se representan por flechas discontinuas (*A*). Una sección transversal (*B*) muestra esas mismas células extendiéndose

te de montaña, el número de diferentes MAC específicas no precisa ser, ni con mucho, tan elevado como el número de marcadores de reconocimiento postulados en el modelo del Mont-Saint-Michel, con tal de que exista alguna vía dinámica para alterar la fuerza de unión entre las MAC. Pero seguro también que no bastará un solo tipo de MAC. Dado el alcance dinámico del modelo cinético, quizá se requieran moléculas con nuevas especificidades para generar ciertos modelos.

Todo esto debería dejar clara una cosa: la necesidad de distinguir entre adhesión celular y reconocimiento celular. Si interviene la proximidad celular, el reconocimiento a través de los marcadores establecidos supone la especificidad local (modelo Mont-Saint-Michel); ahora bien, si la adhesión está sujeta a cambios dinámicos, no necesita de suyo tal grado de reconocimiento. El patrón puede surgir sin reconocimiento individual célula a célula, y debe, por tanto, distinguirse entre especificidad del reconocimiento y selectividad (o fijación del patrón) que puede derivarse de la interacción entre diversos procesos dinámicos.

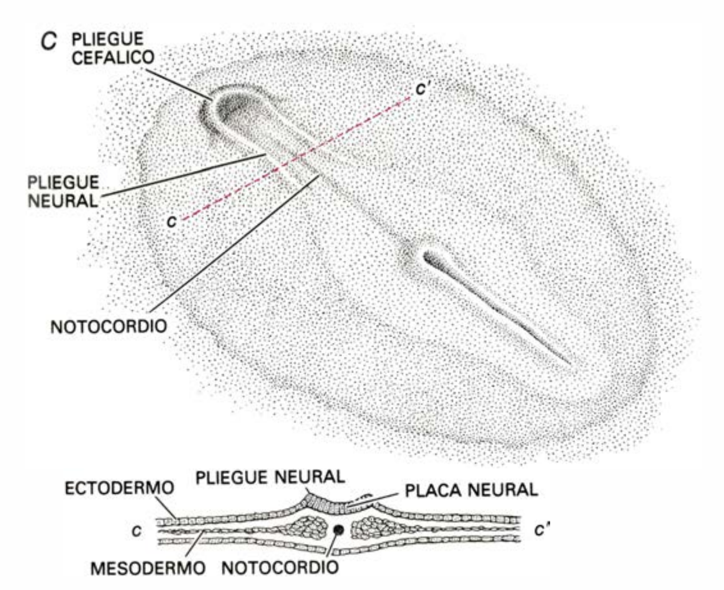
Y aún hay que hacer otra distinción. No deben confundirse los nombres de las diferentes células que se unen con los nombres de las distintas moléculas que median su unión. Por convención, denominamos homotípica la unión de células similares y, homofílica, la unión de moléculas similares. La distinción no es trivial: pueden darse uniones heterotípicas (entre distintos tipos de células) por un mecanismo homofílico (mediado por moléculas similares).

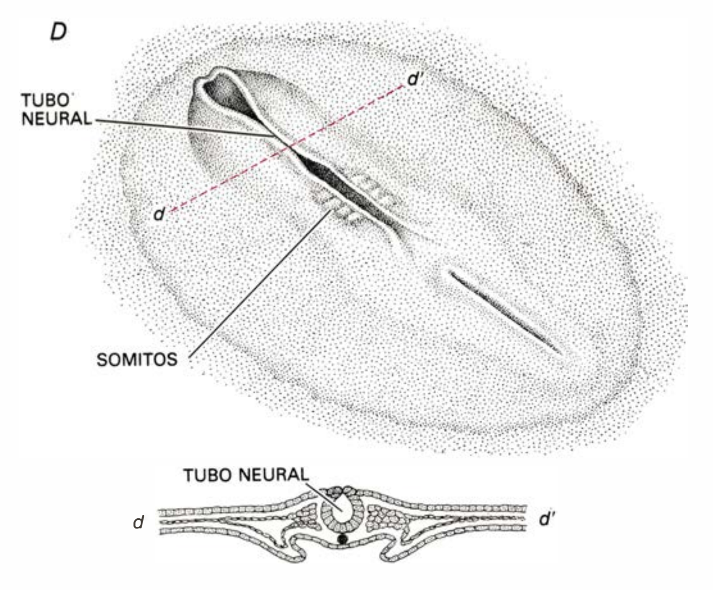
Emprendimos, mis colegas y yo, la búsqueda de MAC partiendo del supuesto de que debía tratarse de moléculas de la superficie celular, probablemente proteínas y, probablemente también, escasas. Para descubrir una proteína escasa que presente actividad definida se desarrollan anticuerpos específicos capaces de inhibir la actividad proteica, entre otras estrategias. El antígeno purificado que se una a tales anticuerpos corresponderá, probablemente, a la proteína deseada. En cada etapa del proceso de purificación debe medirse en qué cuantía aumenta la actividad (adhesión celular en el caso de las supuestas MAC) a medida que se purifica la proteína. Desarrollamos dos tipos de pruebas: ensayos de detección, que revelarían la presencia de MAC y medirían su actividad, y ensayos de perturbación, que revelarían la capacidad, de los anticuerpos específicos contra supuestas MAC, de interferir con la adhesión celular que mediaban las MAC, con el consiguiente trastorno de los patrones hísticos.

Para los ensayos de detección disociamos las células de un tejido por digestión con tripsina, enzima que degrada las moléculas proteicas de la superficie celular. Después de un tiempo de recuperación, durante el cual las células aisladas podían sintetizar de nuevo sus proteínas de superficie, se dejaba que las células se aproximaran y se adhirieran unas a otras.

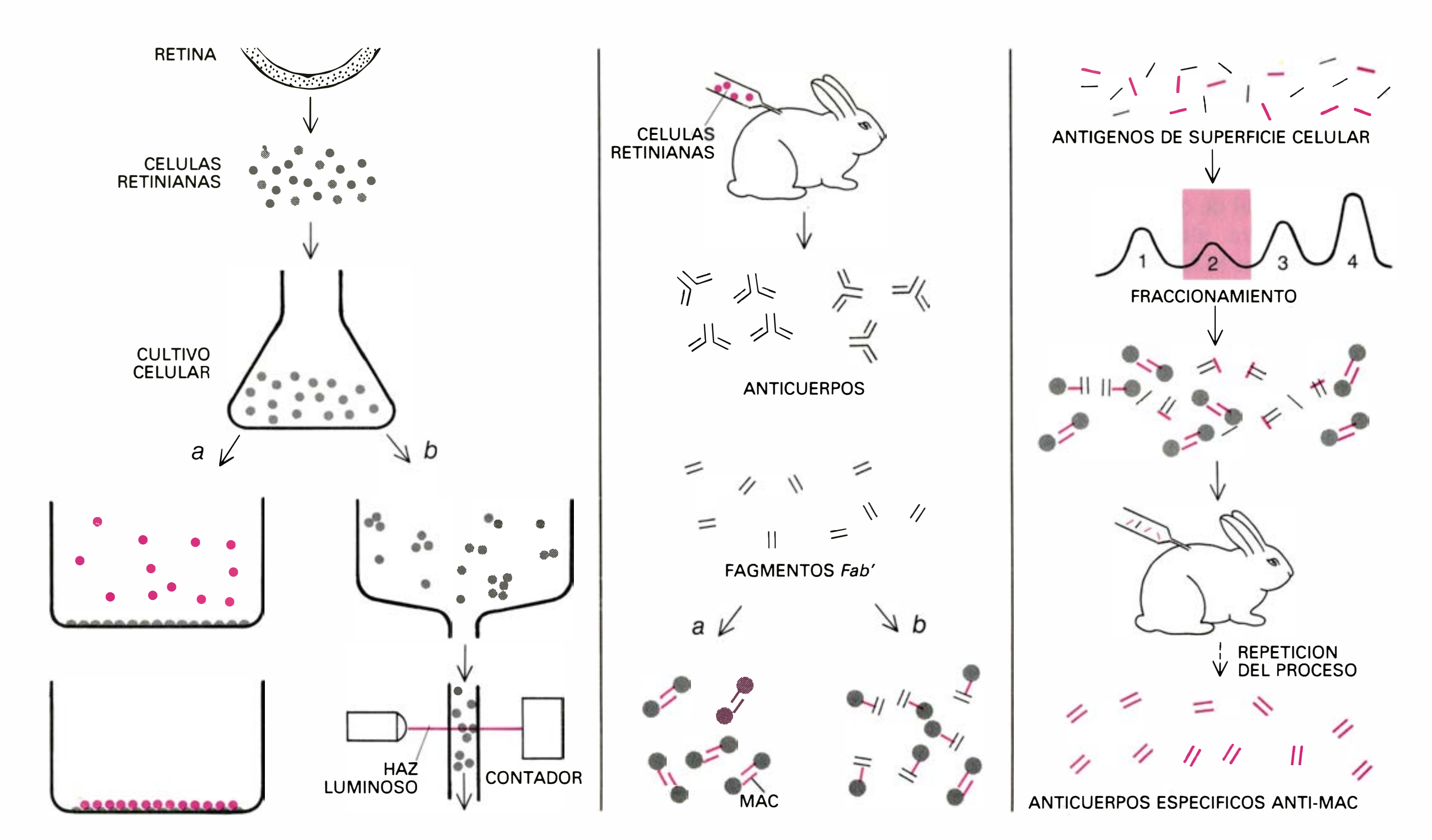
Para detectar las moléculas específicas responsables de la unión de superficies celulares aprovechamos una idea de Günther Gerisch, del Instituto Max Planck de Bioquímica, quien utilizaba anticuerpos para perturbar la adhesión en hongos filamentosos: buscamos anticuerpos anti-MAC que bloquearan específicamente la adhesión. A tal fin se inmunizaron conejos con cerebro de pollo y tejido retiniano y se analizó, en los anticuerpos resultantes, su capacidad para bloquear la adhesión. (Los anticuerpos, que tienen forma de *Y*, se seccionaron primero en fragmentos "univalentes", denominados *Fab'*, que se unen a su molécula antigénica por un solo sitio. Los anticuerpos son bivalentes, por lo que, en vez de bloquear la adhesión, habrían, de hecho, unido dos células mediante sus MAC.) Tras un año de laboriosa búsqueda, nuestros ensayos de detección revelaron la presencia de anticuerpos específicos bloqueadores de la adhesión. Obviamente, en el suero de conejo aparecían mezclados con otros anticuerpos dirigidos contra diversas moléculas de la superficie celular. Tal heterogeneidad impedía su aprovechamiento en pruebas específicas de identificación o aislamiento de las MAC.

Para reducir la heterogeneidad de la población de anticuerpos diseñamos un ensayo de "neutralización". Se analizó en fracciones sucesivas de antígenos de superficie su capacidad para unirse con los anticuerpos responsables de la inhibición, es decir, de neutralizar su acción inhibidora. Se reinmunizaban luego los conejos con las fracciones neutralizantes del antígeno de superficie, relativamente enriquecidas en MAC. Por iteración del procedimiento se obtuvieron fracciones antigénicas suficientemente puras para producir, en





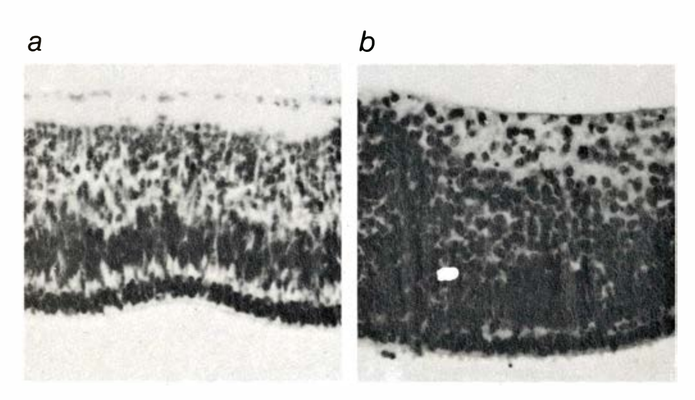
para formar lo que constituirá el mesoblasto y, en última instancia, el mesodermo. La sección sagital (*b-b'*) abarca cuan larga es la línea primitiva. En la inducción primaria (neural) las interacciones entre mesodermo y endodermo dan lugar a la formación de la placa neural (*C*). La placa se pliega para formar el tubo neural e, inmediatamente, las células mesodérmicas se segregan para desarrollar los precursores segmentados denominados somitos (*D*).

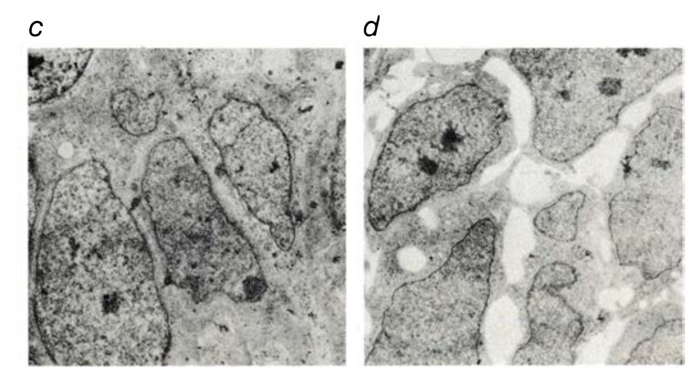


3. AISLAMIENTO DE LAS MAC según el protocolo ideado por el autor en colaboración con Robert Brackenbury, Urs Rutishauser y Jean-Paul Thiery. Mediante ensayos de adhesión (*izquierda*) se comprueba la actividad de las MAC en cada fase. Se disocian células retinianas de pollo y se permite que regeneren sus moléculas de superficie. Su adhesión se comprueba contando las células marcadas que se unen a una capa de células fijas (*a*) o bien agitando el conjunto y midiendo su grado de agregación (*b*). En un ensayo de inhibición (*centro*) se inmunizan conejos con células retinianas de pollo para obtener anticuerpos contra las proteínas de superficie celular. Se degradan los anticuerpos, de los que se recuperan fragmentos *Fab'* univalentes. En condiciones normales, las células retianas de pollo se adhieren entre sí (*a*); los fragmentos de anticuerpo anti-MAC inhiben esa adhesión uniéndose a las MAC (*color*) (*b*). Para identificar anticuerpos anti-MAC específicos se aplica un ensayo de neutralización (*derecha*). Se fraccionan los antígenos de superficie de las células retinianas (MAC incluidas) y se comprueba la capacidad de las diversas fracciones para unirse con los anticuerpos responsables de la inhibición, y neutralizar así la inhibición. Una fracción (*color*) que neutralice con eficacia denotará una alta concentración de MAC, por lo que el suero sanguíneo de conejos inmunizados con esa fracción será rico en anticuerpos anti-MAC. La iteración del proceso rinde anticuerpos anti-MAC muy específicos.

conejos, anticuerpos anti-MAC altamente específicos y, en el ratón, anticuerpos monoclonales aún más específicos. Una vez reconocida la naturaleza de los antígenos MAC, podíamos producir anticuerpos anti-MAC de varias especies animales.

La disponibilidad de tal variedad de anticuerpos nos permitía estudiar la distribución de las MAC en distintos tejidos, así como intentar alterar específicamente el desarrollo de patrones hísticos. Marcando los anticuerpos (obtenidos con antígenos de cerebro y retina) con un marcador fluorescente comprobamos que una determinada molécula de adhesión celular nerviosa, que designamos N-MAC, se hallaba en todas las neuronas del sistema nervioso central y periférico. Los anti-N-MAC rompían, en cultivos de tejidos, el desarrollo ordenado de los tejidos nerviosos, como el de la retina. Técnicas similares llevaron a la identificación de las otras moléculas de adhesión: H-MAC, aisladas originalmente intactas a partir de células de hígado embrionario por





4. EL ANTICUERPO ANTI-N-MAC perturba el crecimiento ordenado del tejido nervioso embrionario. Se extrajeron retinas de embriones de pollo de seis días y se cultivaron durante tres días con anticuerpos normales de conejo (fragmentos *Fab'* univalentes) como control (*a, c*) y con anticuerpo anti-N-MAC altamente específico (*b* y *d*). Las microfotografías muestran que la estructura normal en capas de la retina (*a*) se desordena en presencia del anticuerpo anti-N-MAC (*b*). Las electromicrografías de células de los mismos tejidos destacan la íntima aposición de las membranas celulares de la muestra normal (*c*) frente al menor grado de contacto intercelular y las grandes áreas de espacio extracelular del tejido retiniano, que aparece desordenado (*d*).

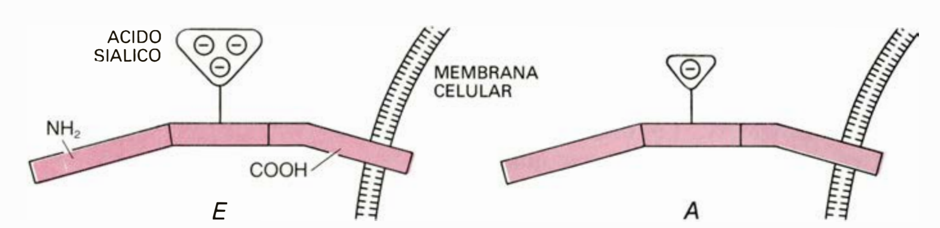
Bruce A. Cunningham y Warren J. Gallin, y Ng-MAC (por neuroglía), que aislé de neuronas en colaboración con Martin Grumet.

Aplicando el fraccionamiento cromatográfico clásico y cromatografía de afinidad (que se funda en la especificidad de los anticuerpos anti-MAC) purificamos N-MAC y H-MAC lo suficiente para que Cunningham y sus colaboradores emprendieran el análisis de su estructura. Ambas moléculas son glucoproteínas, es decir, proteínas a las que se han unido moléculas de azúcar. La N-MAC se sale de lo corriente, en el sentido de que presenta cantidades extraordinarias de un glúcido complejo cargado negativamente, denominado ácido siálico, bajo una forma polimerizada poco común.

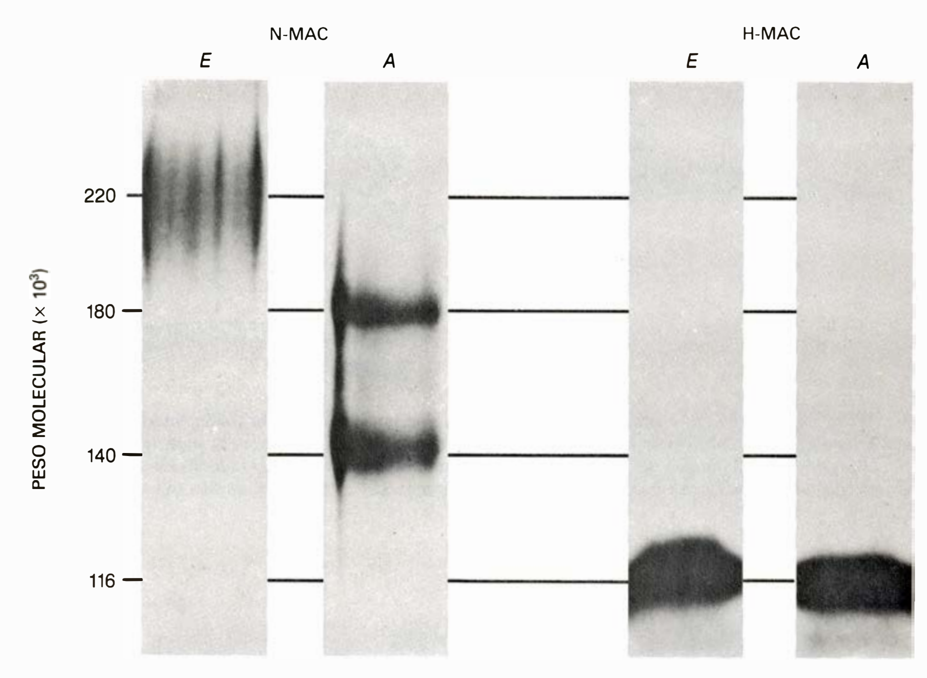
Tras purificarlas, degradamos las moléculas de adhesión con enzimas para elaborar mapas lineales de N-MAC y H-MAC. Los mapas revelaron que las moléculas diferían en su estructura. La cadena proteica de N-MAC (que, azúcar aparte, tiene un peso molecular máximo de 160.000) consta de tres dominios, unidos por dos eslabones de la cadena particularmente susceptibles a la escisión enzimática. El dominio donde se ubica el extremo amino se proyecta fuera de la célula e incorpora una región que se une a una zona equivalente de la N-MAC de otra célula; el dominio central porta la gran masa de ácido siálico; la porción que contiene el extremo carboxilo está asociada con la membrana celular, y parte de la misma aparece insertada en su bicapa de moléculas lípidas.

Descubrimos que la cadena N-MAC completa mostraba gran facilidad para asociarse con vesículas lipídicas artificiales, lo cual nos permitía montar un sistema experimental donde estudiar el comportamiento de unión de la molécula. Por ejemplo, si las vesículas llevaban N-MAC, se unían a células nerviosas; pero si se trataban antes las células con fragmentos del anticuerpo anti-N-MAC, las vesículas no se unían a ellas. Se confirmaba así nuestra primera hipótesis de que el mecanismo de adhesión era homofílico: las N-MAC de una célula se unían a las N-MAC de otra.

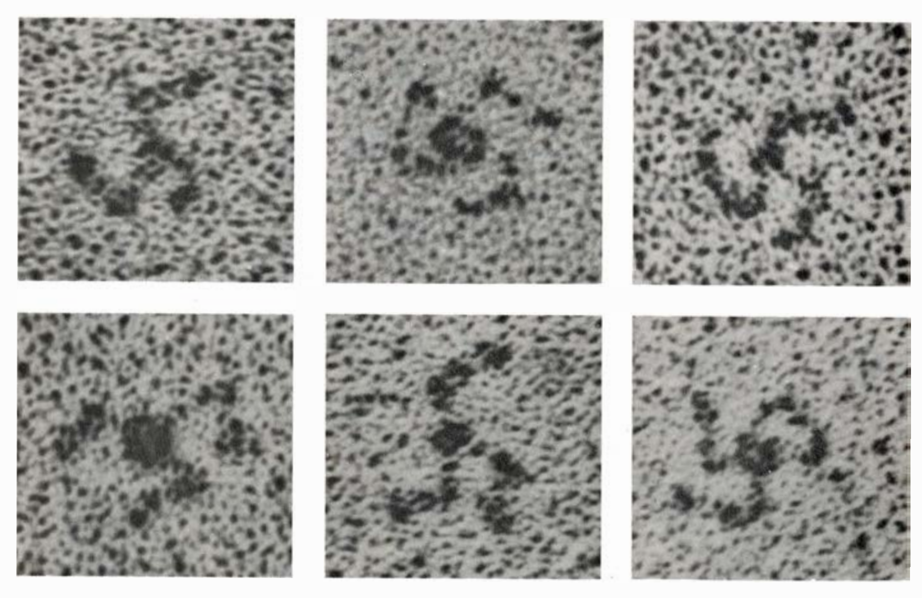
La supuesta existencia de dominios en las N-MAC parece confirmarse tras recientes estudios de microscopio electrónico realizados en colaboración con Carolyn Cohen, de la Universidad de Brandeis. Si se deposita N-MAC sobre una rejilla y se sombrea con un metal, algunas moléculas (aunque no todas) presentan una destacada estructura tri-



5. MOLECULA DE ADHESION CELULAR NERVIOSA, N-MAC, representada en su forma embrionaria (*E*) (*izquierda*) y en su forma adulta (*A*) (*derecha*). En la cadena proteica (*color*) se distinguen tres dominios: en el que contiene el extremo amínico (*NH_2*) se ubica una región de unión; el central, donde se encuentran grupos de ácido polisiálico, y el dominio del terminal carboxilo (*COOH*), asociado con la membrana celular (quizás inserto en ella). La forma *E* contiene tres veces más ácido siálico que la *A*.



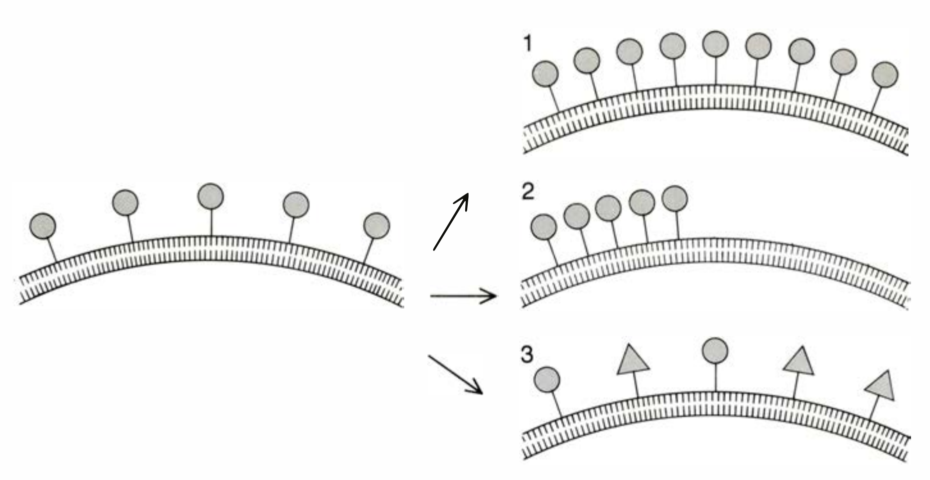
6. DIFERENCIAS EN EL CONTENIDO DE ACIDO SIALICO, reveladas por electroforesis. La N-MAC embrionaria del pollo (*E*) forma una banda difusa correspondiente a un peso molecular de entre 200.000 y 250.000, mientras que la forma adulta (*A*) forma dos bandas nítidas más ligeras (*izquierda*). En otra molécula de adhesión celular, H-MAC, no se aprecian diferencias entre formas *E* y *A* (*derecha*).



7. N-MAC AISLADAS purificadas por Bruce A. Cunningham. Algunas MAC, depositadas sobre una rejilla de microscopio electrónico y sombreadas con un metal, forman estructuras tripartitas, denominadas trisqueliones ("triskelions"); se recogen aquí seis ejemplos con un aumento de 440.000 diámetros. Cada brazo del trisquelion podría comprender a la cadena proteica de una molécula N-MAC. Se ignora si la N-MAC adopta precisamente esta forma sobre la superficie celular. (Micrografías de Carolyn Cohen.)

partita, que se ha dado en llamar trisquelion. Probablemente cada brazo de esa estructura corresponda a una cadena proteica N-MAC. Los brazos se doblan en sendas formaciones que quizá correspondan a aquellos dominios. Nuevas investigaciones de las N-MAC en membranas habrán de revelar sin duda otras formas de la molécula, lo que permitirá contrastar qué semejanza guardan las conformaciones de las N-MAC en la célula viva con las que se distinguen en la rejilla del microscopio electrónico.

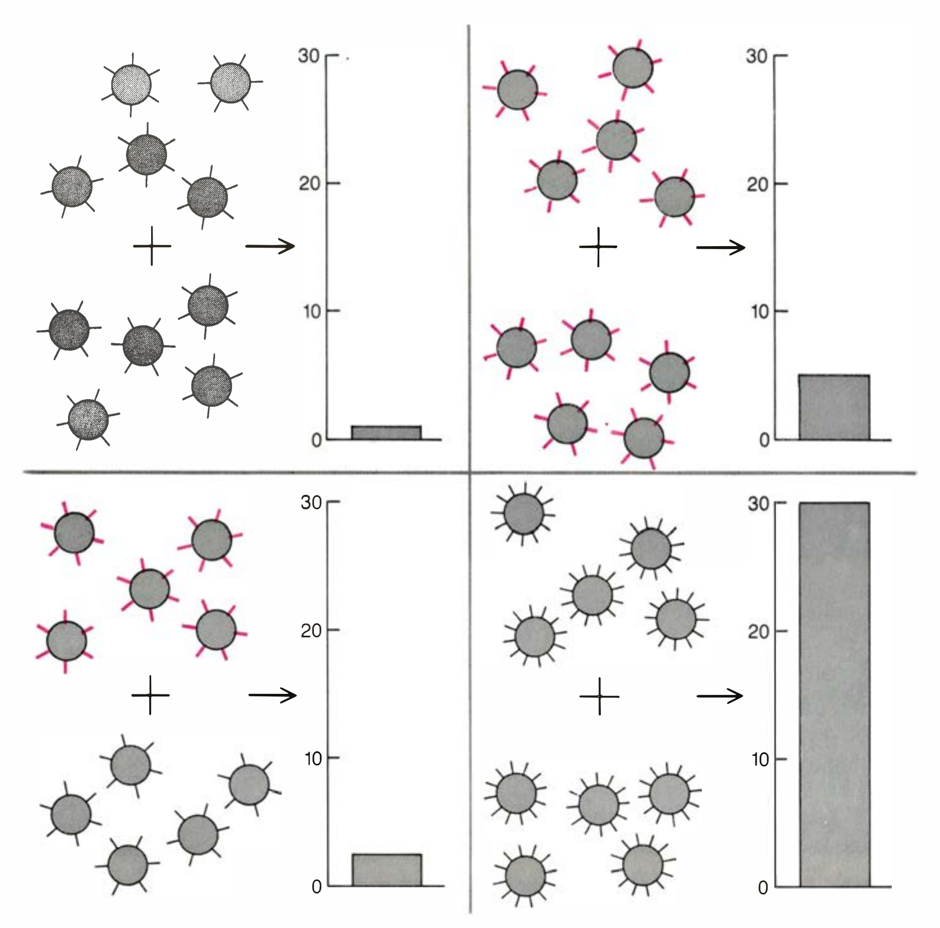
Nos intrigaba el papel que pudiera desempeñar en la unión intercelular el contenido inusual de ácido siálico. Descubrimos que ninguno: las moléculas N-MAC de las que se extrajo todo el ácido siálico por ataque con la enzima sialidasa seguían estableciendo uniones específicas. Pero el hallazgo no descartaba la intervención indirecta del ácido siálico en la unión. En efecto, dos observaciones revelaron una función inesperada, pero de suma importancia, para el azúcar. La primera fue que existen dos formas principales de la molécula N-MAC: N-MAC de cerebro embrionario y N-MAC de cerebro adulto. N-MAC de cerebro embrionario encierra 30 gramos de ácido siálico por cada 100 gramos de proteína. Sometida a electroforesis, forma una banda difusa correspondiente a un peso molecular de entre 200.000 y 250.000. Por su parte, la N-MAC de cerebro adulto encierra sólo 10 gramos de ácido siálico por cada 100 gramos de proteína y forma dos o tres bandas nítidas en el gel electroforético. En algún estadio del desarrollo la forma embrionaria (*E*) de la molécula debe transformarse en, o intercambiarse por, una de las diversas formas adultas (*A*). La segunda observación importante fue que las formas *A* parecen establecer uniones más eficaces que la forma *E*. Como se verá después, importantes cambios en las cantidades relativas de la forma *E* y de las formas *A* en diferentes partes del sistema nervioso en desarrollo pueden interpretarse a la luz de esta unión diferente.



8. MODULACION LOCAL de la superficie celular, que podría alterar la unión intercelular de tres maneras distintas: modificando el predominio de una determinada MAC sobre la superficie de la célula (*1*); alterando su distribución por la superficie (*2*), o cambiando químicamente la molécula (*3*), como se ha observado en la transformación de la forma embrionaria (*E*) a la forma adulta (*A*) de la N-MAC.

La estructura pormenorizada de las otras dos moléculas de adhesión celular identificadas está por definir, lo que no empece que sepamos que las moléculas difieren claramente entre sí y de las N-MAC. H-MAC tiene un peso molecular de 124.000, inferior al de N-MAC, y carece del extraño grupo de ácido siálico. Al contrario que N-MAC, H-MAC media la adhesión celular sólo en presencia de iones calcio. No se sabe a ciencia cierta si la unión de H-MAC es homofílica. Estudios estructurales y de ruptura de H-MAC indican que la porción proteica de la molécula también difiere considerablemente de la de N-MAC. Aunque H-MAC se aisló en principio de células hepáticas, desempeña, en conjunto con N-MAC, un papel fundamental durante el desarrollo precoz del embrión.

La tercera molécula de adhesión, aislada recientemente, es Ng-MAC, que aparece más tarde en el desarrollo y media la unión de neuronas con las células de soporte del sistema nervioso conocidas por glía. El componente principal de las Ng-MAC tiene un peso molecular de 135.0000; con anticuerpos contra esta MAC se aíslan también otros dos componentes, de mayor y menor peso molecular. La Ng-MAC se

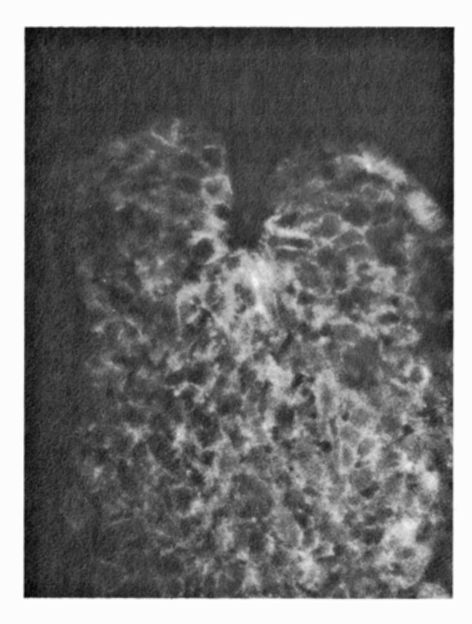
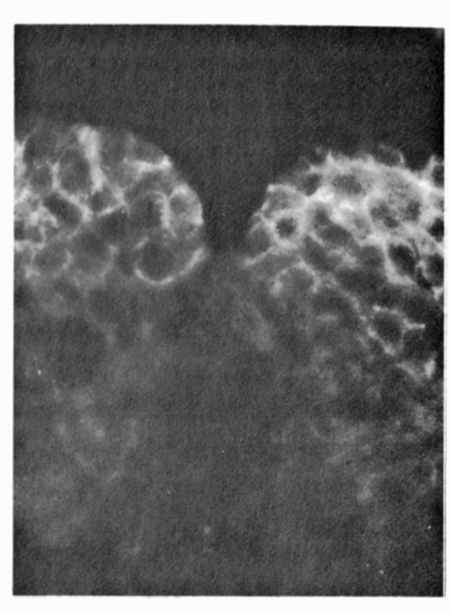


9. TASA DE AGREGACION de vesículas lípidas artificiales portadoras de la forma *E* (*negro*) y *A* (*color*) de N-MAC, según mediciones de Stanley Hoffman. Los resultados sugieren que dos formas de modulación de superficie pueden aumentar el ritmo de agregación: la conversión de *E* en *A*, que multiplicó la tasa por cinco, y la duplicación del predominio de una forma de N-MAC, que dio una tasa 30 veces mayor.

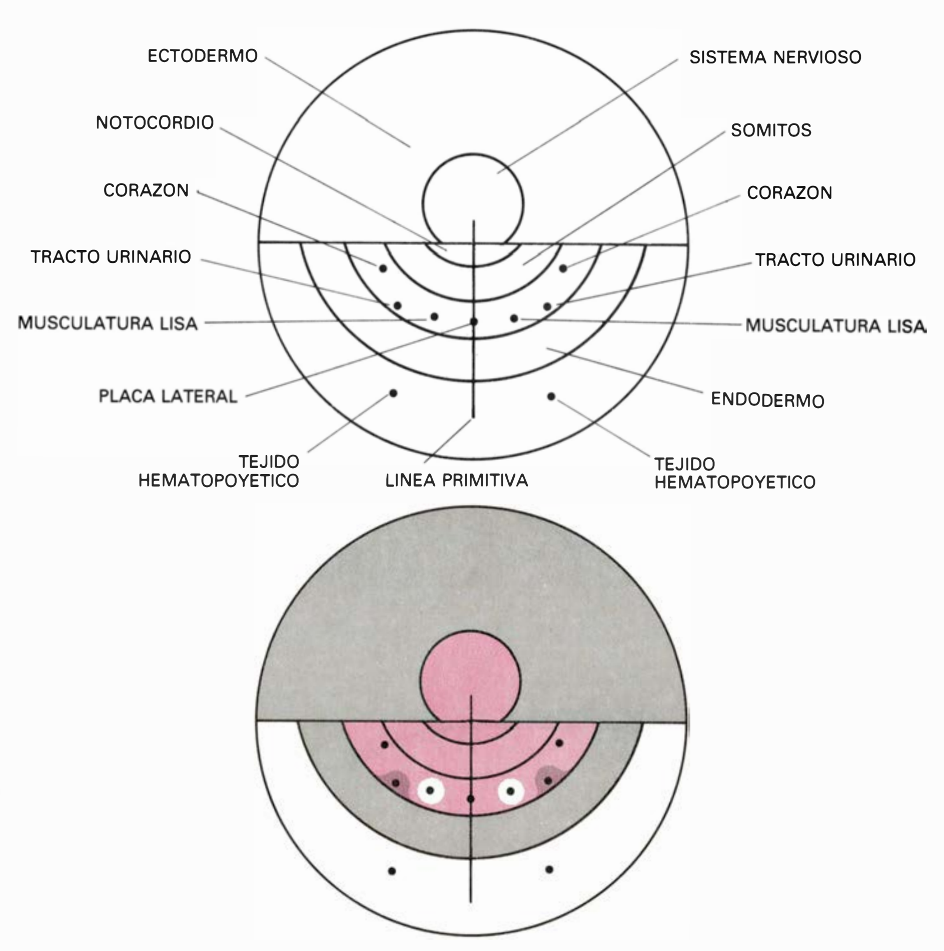
encuentra en las neuronas, pero no en la glía a la que se adhieren las neuronas. Probablemente se enlace con una molécula de adhesión de la glía que no se ha identificado aún. En otras palabras, el mecanismo de unión parece del tipo heterofílico. Por lo que se ve, N-MAC, H-MAC y Ng-MAC carecen de especificidad cruzada, es decir, ninguna establece uniones intercelulares eficaces con las otras dos. Queda por esclarecer la interacción que pueda darse entre N-MAC y Ng-MAC de una misma neurona.

Si el modelo del torrente de montaña es aplicable a la unión celular y a la formación del patrón, cabe esperar la existencia de mecanismos que alteren la tasa o la fuerza de unión entre moléculas de adhesión celular de diferentes células. En 1976 propuse que quizá la modulación local de la superficie celular (cambios en la cantidad, distribución o composición química de determinadas moléculas de la superficie celular) efectuara dichos cambios de unión. Sería de esperar que esos cambios modificaran las interacciones entre células expuestas a otros procesos fundamentales, como son los movimientos morfogenéticos. Las alteraciones de la interacción que afectaran a procesos básicos promoverían, a su vez, la formación de diferentes patrones. Hemos encontrado que, efectivamente, durante la embriogénesis precoz se producen cambios de predominio de diversas MAC, y que una importante reducción de la cantidad de ácido siálico, la conversión de E en A, se observa en las N-MAC durante el desarrollo perinatal (aproximadamente en el momento del nacimiento, en el ratón, y de la eclosión, en el pollo).

Para demostrar que esos cambios moduladores podían realmente afectar a la unión debía procederse a un ensayo molecular directo. Con Stanley Hofman, decidimos medir la tasa de agregación de diversas combinaciones de vesículas lipídicas artificiales en las que se había insertado la forma E o las formas A de N-MAC. Predijimos que las vesículas E mostrarían una tasa de agregación inferior a la de las vesículas A y que las vesículas A presentarían una tasa de agregación mutua máxima. La predicción se basaba en la idea de que el ácido siálico del dominio medio, o alteraba la forma del dominio de unión, o repelía directamente la molécula N-MAC opuesta y correspondiente a otra célula; cuanto menor fuera la cantidad de azúcar, mayor sería la tasa de agregación. La predicción se confirmó plenamente.

10. EXPRESION DE DOS MAC localizada mediante inmunofluorescencia por Thiery. Se trataron secciones adyacentes de tejido con anticuerpos anti-N-MAC (*izquierda*) y anti-H-MAC (*derecha*). Los anticuerpos se habían marcado con un colorante fluorescente. En una sección transversal de la placa neural en el momento de formarse el surco neural, grandes cantidades de N-MAC se encuentran en el ectodermo neural de la base del surco. H-MAC, por el contrario, está confinada al ectodermo no nervioso que flanquea el surco. En una fase más precoz, el blastodermo se teñía de manera uniforme para ambas.



11. MAPA DE DESTINO elaborado a partir del original de Luc Vakaet, de la Universidad estatal de Amberes (*arriba*). Sobre un disco que representa la superficie del blastodermo, se señala el origen de las células que formarán diversos tejidos y órganos. Combinándolo con datos de inmunofluorescencia, se preparó un mapa compuesto de destino MAC (*abajo*) que muestra la distribución de N-MAC (*color*) y H-MAC (*gris*) y los tejidos que carecen de ambas (*blanco*). Se aprecia un somero gradiente N-MAC, indicado por dos intensidades de color. Las células mesodérmicas que forman el tracto urinario expresan ambas MAC. Nótese que las regiones ectodérmicas centrales nerviosas, y algunas regiones mesodérmicas que expresan N-MAC, aparecen rodeadas de regiones H-MAC: ectodermo no nervioso y endodermo.

Más sorprendente resultó el efecto que producía el aumento de la cantidad de una N-MAC determinada en la membrana. Duplicar una cantidad rendía tasas de unión 30 veces superiores, y más. Puede esperarse, por tanto, que la conversión de E en A y los cambios de predominio en la superficie redunden en grandes cambios en las tasas de agregación durante el curso del desarrollo, condición necesaria para cualquier modelo cinéticamente forzado de formación de patrones. Importa reconocer que estos dos cambios modulatorios son esencialmente continuos; definen, pues, un número muy elevado de posibles estados de unión para N-MAC. Similares expectativas se aplican a las MAC de otras especificidades.

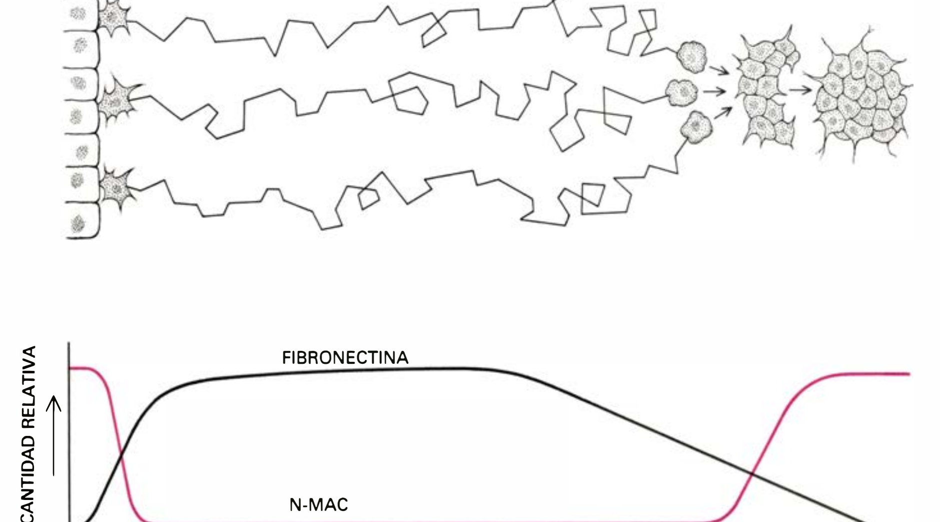
¿Cómo se relacionan los cambios de las MAC con las alteraciones de la forma embrionaria? Con Jean-Paul Thiery, actualmente en el Instituto de Embriología de Nogent-sur-Marne, encontramos que tanto N-MAC como H-MAC podían detectarse muy precozmente en el embrión de pollo. Justo antes de la formación de las capas germinales, el epiblasto y el hipoblasto se tiñen de una manera bastante uniforme con anticuerpos fluorescentes contra ambas MAC. Más tarde, al desarrollarse la línea primitiva, las células de la capa media que migran no se tiñen. En esta fase del desarrollo se observa un conjunto de transiciones importantes. Las células que darán la placa neural dejan de teñirse con anticuerpo contra H-MAC, pero sí lo hacen intensamente con anticuerpos anti-N-MAC. En la región circundante se aprecia un cambio conjugado: se desarrolla un borde entre el ectodermo neural y no neural, tiñéndose las células no neurales sólo con anticuerpos anti-H-MAC, al igual que las células endodérmicas. La aparición de ese modelo de segregación MAC y de formación del borde acompaña el acontecimiento, crítico, de la inducción neural.

¿En qué medida afectan al patrón éstos y los subsiguientes cambios en la distribución de las MAC? Los embriólogos dibujan "mapas de destino" donde muestran qué será de las células en cada región embrionaria, indicando los tejidos y estructuras a que darán lugar en un determinado período de tiempo. Luc Vakaet, de la Universidad estatal de Amberes, Bélgica, elaboró un mapa de destino muy minucioso; ilustra el destino de las células del blastodermo del pollo al culminar la formación de los órganos. Por nuestra parte, seguimos la pista de la expresión MAC de esas células y sus descendientes y construimos un mapa de destino compuesto de las MAC, combinando nuestros resultados con los de Vakaet [*véase la figura 11*]. El mapa compuesto revela numerosas y sorprendentes características. Para apreciarlas debe tenerse en cuenta que la distribución tetradimensional (el tiempo y las tres dimensiones espaciales) de las células y marcadores MAC se transforma en un mapa de dos dimensiones, donde se representa la lámina de células progenitoras del blastodermo. Así, más que un mapa topográfico se obtiene un mapa topológico, en el que se sacrifican los pormenores de la estructura para destacar la conexión y adyacencia, relaciones particularmente importantes para los episodios de inducción embrionaria.

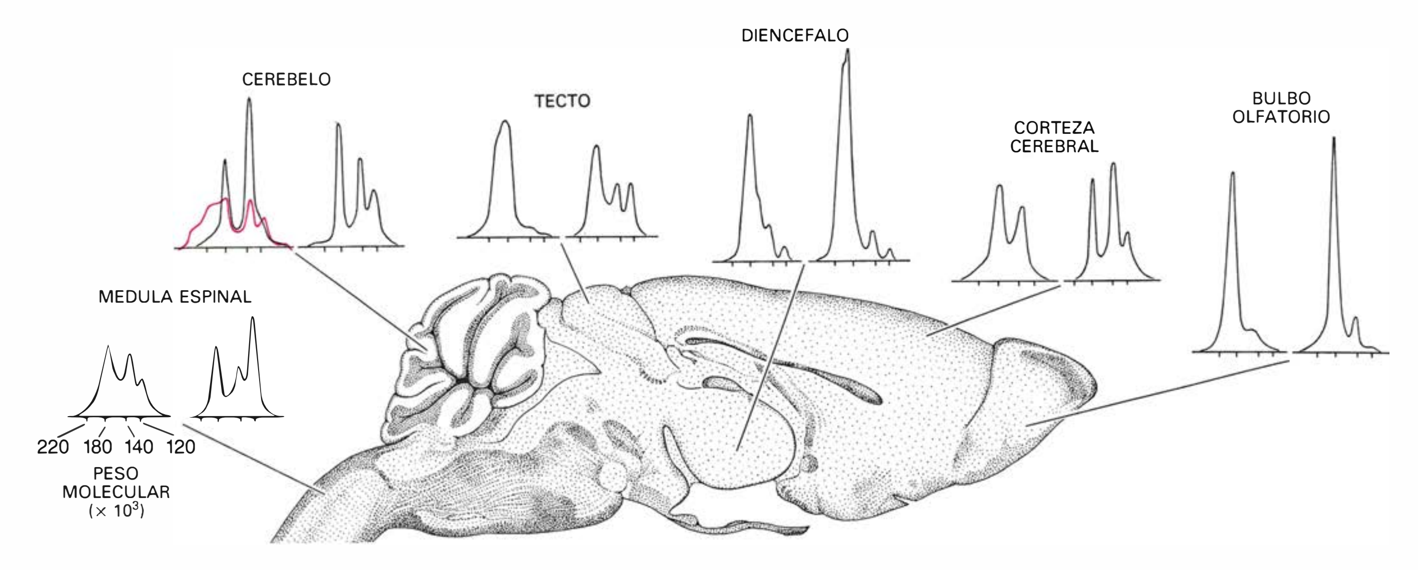
La primera nota sorprendente es que las regiones N-MAC más centrales, destinadas a formar la placa neural, notocordio, somitos y ciertas partes del mesodermo de la placa lateral, aparecen completamente rodeadas de un anillo contiguo y conexo de regiones que expresarán H-MAC; estas regiones, en conjunto, corresponden al ectodermo no neural y al endodermo. En segundo lugar, se aprecia un somero gradiente, en sentido céfalo-caudal, de tinción N-MAC. La tinción es más intensa en la región de la placa neural; menos, en regiones subyacentes, como el notocordio, donde el patrón es dinámico: al principio no hay tinción para N-MAC, luego el notocordio (una estructura mesodérmica) se tiñe intensamente y, finalmente, la tinción desaparece. Secuencia similar de aparición y desaparición N-MAC se da en los somitos.

Una tercera sucesión de interés se observa en los elementos renales de origen mesodérmico: H-MAC y N-MAC aparecen y desaparecen en secuencias que corresponden a las fases finales de la inducción embrionaria recíproca de una masa celular (el mesénquima mesonéfrico) por el conducto tubular wolffiano. Primero, la H-MAC aparece en el conducto, luego aparece la N-MAC en los túbulos mesonéfricos, al organizarse éstos en epitelios a partir del mesénquima, sustituyéndose por H-MAC al extenderse los túbulos más tarde. Finalmente, el mapa presenta regiones que no se tiñen con anticuerpos anti-N-MAC o H-MAC. Eso sugiere que al menos otra molécula de adhesión celular de aparición precoz, todavía no identificada, media en las interacciones adhesivas de las estructuras que derivan de esas áreas durante el desarrollo precoz.

Caben aquí dos generalizaciones. Una es que las MAC sufren cambios dinámicos en el orden de su aparición, distribución y cantidad, dondequiera que se den inducciones primarias y secundarias. La otra es que, dondequiera que los epitelios se conviertan en mesénquima, parece que las MAC se pierden de la superficie celular.



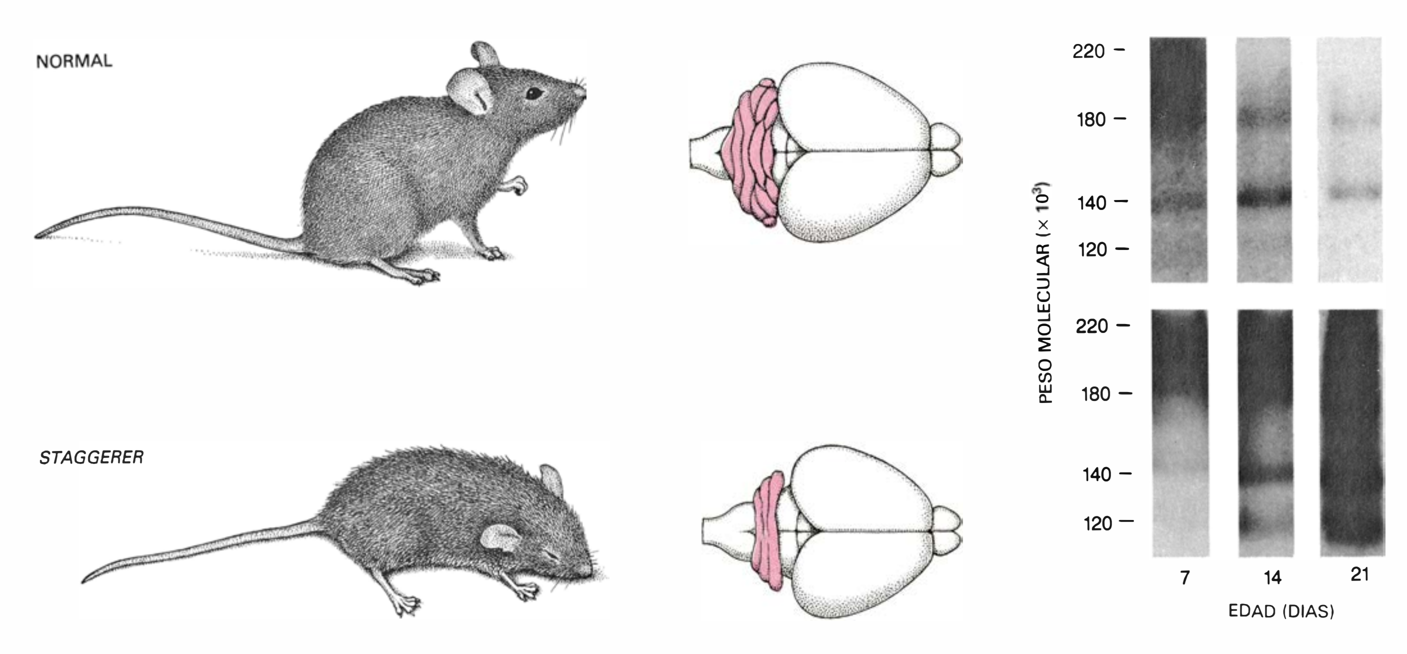
12. LA MIGRACION CELULAR va acompañada de grandes cambios en la expresión MAC; así se demostró en un estudio de las células de la cresta neural realizado por Thiery. Se originan esas células en la parte superior del tubo neural y migran ampliamente para originar diversas estructuras: ganglios autónomos y sensoriales, entre otras. Arriba se esquematizan los recorridos típicos de tres células de ese tipo al alejarse del tubo neural y unirse a otras células para formar un ganglio (*derecha*). Una de las curvas muestra que la N-MAC, presente en las células antes de partir, desaparece de la superficie durante el recorrido y reaparece al alcanzarse el destino e interactuar con otras células. La otra curva muestra la existencia de un aumento y disminución coordinados de fibronectina, una molécula de sustrato, que, según había demostrado Thiery previamente, sirve de alfombra sobre la que se desplazan las células.



13. PATRON DE CONVERSION de *E* en *A*; no es el mismo en distintas partes del cerebro de ratón. La expresión diferencial de las formas embrionaria y adulta de N-MAC se recoge en cinco pares de curvas de otras tantas regiones. Cada curva representa un barrido densitométrico de un gel electroforético sobre el que se fraccionó la MAC extraída de una determinada región; las curvas izquierdas corresponden a ratones de 21 días y, las derechas, a ratones de 180 días. La densidad óptica (reflejo de la cantidad de MAC) se recoge en el eje vertical; el peso molecular, en el horizontal. La forma embrionaria (*E*) corresponde a un peso algo superior a 200.000, y las tres formas adultas a 180.000, 140.000 y 120.000. En la mayoría de las regiones se aprecia muy poca cantidad de la forma *E* a los 21 días, y menos o ninguna a los 180 días, aunque el momento y el grado de la conversión difieren en las distintas regiones. En el ratón mutante *staggerer* la conversión se retrasa considerablemente en el cerebelo (*curva de color*): a los 21 días aparece aún gran cantidad de la forma *E* de N-MAC, y una concentración inferior a la normal de las distintas formas de *A*. La conversión de *E* en *A* es de carácter epigenético.

Una interpretación del mapa, en cierto modo fantasiosa, sugiere cómo pueden derivarse ciertos patrones. Si consideramos que tanto la unión N-MAC como la H-MAC son homofílicas, entonces, dados los movimientos morfogenéticos conocidos, se deduce del mapa cómo puede enrollarse la placa neural y formar un tubo neural cerrado por interacciones N-MAC, y cómo las interacciones homotípicas entre células endodérmicas del interior pueden formar el intestino. El mapa también sugiere por qué estructuras como el intestino y la faringe pueden encontrarse con la piel, aunque se originen en distintas capas germinales: lo que tienen en común es la H-MAC. Tanto si estas especulaciones son acertadas, como si no, el mapa revela la topología de las expresiones MAC; expresa también que ninguna MAC está confinada a una única capa germinal. Estos hallazgos ayudan a explicar diversos determinantes de la forma embrionaria y sugieren la importancia crítica de la distribución de las MAC y sus secuencias de expresión. Aunque, por sí solas, las MAC no especifican la forma, es probable que proporcionen limitaciones necesarias en el proceso que conduce a la misma.

¿Cuántas MAC se necesitan para lle-



14. RATON *STAGGERER* (titubeante) comparado con un ejemplar normal. Los ratones homocigotos para la mutación *staggerer* (que la han heredado de ambos progenitores) son atáxicos: mantienen una postura anormal, se desplazan sin rumbo y pierden el equilibrio. Son, también, de menor tamaño y más débiles que los normales, no se acicalan y mueren a los 30 días. Su cerebelo (*color*) es pequeño y con notables trastornos en su estructura general, reflejo de errores en el establecimiento de las conexiones nerviosas. Los geles electroforéticos (*derecha*) muestran la existencia de un retraso en la conversión de *E* en *A*, que se traduce en fallos en la migración celular y en la formación de sinapsis. En el cerebelo del ratón normal, la forma *E*, de alto peso molecular, se ha sustituido por las formas *A* de N-MAC a la edad de 14 días; en *staggerer*, la forma *E* persiste como una mancha difusa en el gel, incluso a los 21 días.

	EMBRION PRECOZ	ADULTO
H-MAC	Ectodermo	Piel (capa germinal)
	Mesodermo	Epitelio del tracto urogenital
	Endodermo	Epitelio de los tractos digestivo y respiratorio, órganos linfáticos y glándulas secretoras
N-MAC	Ectodermo	Sistema nervioso
	Mesodermo	Músculo cardiaco, testículos

15. PERSISTENCIA DE LAS MAC en los pollos adultos. Se ubican en los tejidos derivados de las capas germinales en que aparecían en el embrión precoz: H-MAC en las tres capas y, N-MAC, en dos.

nar el mapa de destino? Hasta el presente, dos MAC explican más de los dos tercios de la superficie embrionaria precoz; como antes se dijo, quizá se requiera una tercera MAC primaria, o incluso una cuarta, para completar el mapa; en cualquier caso, parece probable que el número necesario para explicar la embriogénesis precoz no será elevado. Una cuestión relacionada es si, para justificar interacciones hísticas tan refinadas como las que se observan en las últimas fases del desarrollo cerebral, se precisarán otras MAC (o diferentes formas de MAC conocidas). En el cerebro, aunque la N-MAC mantiene su actividad en las interacciones interneuronales en esas fases más tardías, se exige al menos una nueva molécula, la Ng-MAC, para que las neuronas interactúen, heterotípicamente, con la glía a medida que el tejido se desarrolla.

Volvamos ahora a los episodios posteriores de la formación del tejido; en concreto a un estudio de formación de patrones en el cerebro de ratón que ha proporcionado el más impresionante apoyo a la hipótesis de la modulación de superficie y del papel que corresponde a las MAC en la constitución de un órgano en un animal intacto. Así como se aprecian cambios de predominio superficial de las N-MAC, reflejados en el mapa de destino precoz, inferimos que habría de detectarse más adelante, en un tejido, la expresión de otros tipos de modulación. Ejemplo de ello sería la diversidad del grado de conversión de *E* en *A* en regiones nerviosas estructuralmente diferentes. Aunque, en un órgano, una modulación química de este tipo es local y epigenética, debe, no obstante, estar sujeta a control genético.

Cheng-Ming Chuong y el autor descubrieron que el modelo de la conversión de *E* en *A* variaba, efectivamente, de una región histológica del cerebro de ratón a otra. Se apreciaban cantidades relativas sustancialmente distintas de las dos formas de N-MAC en distintas regiones, donde la conversión de *E* en *A* empezaba en momentos diversos, o procedía según una tasa distinta o hasta un grado diferente. La conversión, un acontecimiento epigenético, podría producirse, en una región determinada, por la degradación enzimática de parte del ácido siálico de moléculas MAC de la superficie celular. Alternativamente, podría asistirse a un recambio de MAC en la superficie, remplazándose la forma *E* por una forma *A* a la que alguna enzima intracelular hubiera incorporado cantidades menores de ácido siálico. Cualquiera que sea el mecanismo de esta modulación química, cabe esperar que, al avanzar la histogénesis, la presencia de cantidades diferentes de formas *E* y *A* altere de manera diversa la eficacia de enlace de las células en diferenciación de esas regiones, trastocando de forma dinámica la estructura a medida que progresan la diferenciación celular y el movimiento.

Si bien la conversión de *E* en *A* es epigenética, y depende de la actividad enzimática, las propias enzimas, como otras proteínas, están sometidas a regulación genética. Para investigar la genética de la regulación MAC y la modulación de superficie trabajamos con un grupo de ratones mutantes descubierto por Richard L. Sidman, de la Facultad de Medicina de Harvard. Todos los mutantes presentaban defectos en el desarrollo del cerebelo; síntoma principal era un trastorno del movimiento y del equilibrio denominado ataxia, que empieza a manifestarse en el período perinatal. De los tres mutantes investigados en detalle, el *staggerer* (titubeante) presenta defectos en la conexión de unas neuronas con otras, el *reeler* (tambaleante) y el *weaver* (zigzagueante) presentan trastornos de conexión nerviosos que afectan también a las células gliales; éstas, como ha demostrado Pasko Rakic, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, desempeñan un papel decisivo en la migración de las fibras nerviosas durante el desarrollo normal.

Los síntomas del *staggerer* y los grandes defectos se aprecian sólo en animales homocigotos (aquéllos en que los genes aportados por ambos progenitores llevan la mutación determinante). En estos ratones las sinapsis entre las fibras paralelas del córtex cerebelar y las dendritas densamente ramificadas de las células de Purkinje (de por sí defectuosas en los ratones *staggerer*) son imperfectas. Aparentemente, por culpa del fallo de conexión, los granos cerebelosos, que dan lugar a las fibras paralelas, mueren en grandes cantidades. Tales anomalías producen un animal atáxico, con un cerebelo pequeño y alterado.

Supusimos que los ratones *staggerer* tendrían algún defecto de modulación N-MAC, y así se comprobó: la conversión de *E* en *A* en el cerebelo de los homocigotos veíase muy retrasada, aunque la proteína N-MAC sí parecía normal. Por el contrario, los mutantes *reeler* y *weaver* siguen el protocolo normal en la conversión de *E* en *A*.

Estos hallazgos no aclaran aún la causa del defecto *staggerer*, pero sí sugieren que una consecuencia del defecto genético es el fallo de la síntesis o de la actividad de las enzimas responsables de la conversión. En animales normales, la conversión quizás incremente el nivel de adhesión, deteniendo algunas migraciones celulares. Un defecto de la conversión determinaría, por tanto, una coordinación defectuosa de distintos aspectos del crecimiento, la migración y la formación de sinapsis de las prolongaciones nerviosas.

No obstante, *reeler* y *weaver* demuestran que no todos los defectos de conexión tienen necesariamente que derivar de fallos de adhesión entre neuronas. De hecho, cabe esperar que las neuronas dispongan, para mediar su unión con la glía, de más moléculas de superficie que las N-MAC; esas células de sostén desempeñan papeles de primer orden en la orientación de la histogénesis precoz, tanto en la corteza cerebral como en la cerebelar. Como se ha mencionado, nuestro grupo logró identificar y aislar una molécula de este tipo: la Ng-MAC. Aproximadamente a los tres días y medio, surge en las neuronas centrales del embrión del pollo, justo antes de la aparición definitiva de la glía en el sistema nervioso central. No se representaría junto con N-MAC ni H-MAC en un mapa de destino de MAC muy precoz correspondiente a los tres días; en un mapa posterior se

distinguiría sólo en la región del sistema nervioso. Se trata, por tanto, de una MAC secundaria confinada a ciertos derivados de una sola capa germinal, el ectodermo.

Valdría la pena examinar las Ng-MAC de los ratones *reeler* y *weaver*. Parece probable que la Ng-MAC o alguna MAC complementaria de la glía intervenga en los patrones de migraciones neuronales sobre la glía, y que, por tanto, esté implicada en estos trastornos. Abrigamos la esperanza de hallar una nueva MAC en la glía; no sólo porque carezca de Ng-MAC, sino también porque en la interacción glía-neuronas deben intervenir MAC distintas, esto es, debe producirse por unión heterofílica. Si en la interacción glía-neurona mediara un mecanismo homofílico, no podrían distinguirse las interacciones simultáneas entre neuronas y entre glía y neuronas. A pesar del poder de los mecanismos de modulación, no cabe duda de que ciertas circunstancias histogenéticas requieren MAC de diferentes especificidades. Es la combinación de especificidad y modulación lo que ayuda a conformar el cambio morfogenético.

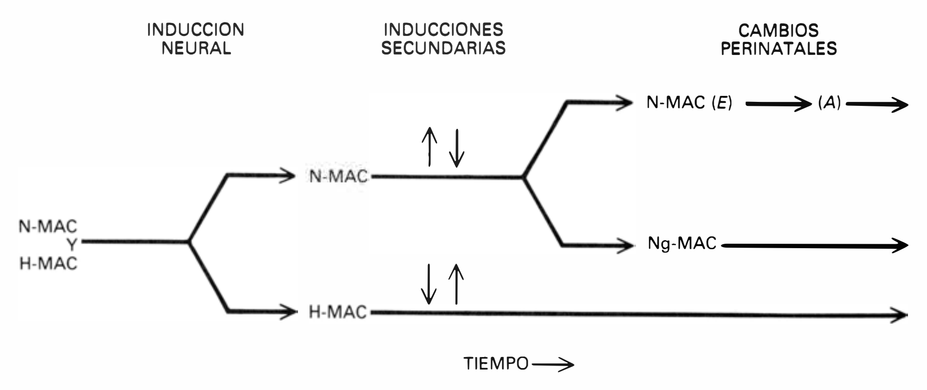
¿Qué resolución microscópica alcanza la conformación morfogenética mediada por MAC? Es decir, ¿qué grado de precisión es capaz de conseguir en un determinado tejido? El cerebro es el más exquisito banco de pruebas para cualquier respuesta. Sería especialmente fascinante, por ejemplo, reseguir el papel de las MAC en la formación de proyecciones de fibras nerviosas concretas, como las de la retina al tecto del cerebro. Los estudios iniciales son prometedores. En colaboración con Scott E. Fraser, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Irvine, hemos demostrado que el mapa retinotectal de la rana *Xenopus laevis* puede alterarse considerablemente en el animal vivo si se introducen anticuerpos anti-N-MAC en el tecto.

Permítasenos un resumen de nuestros datos antes de proponer una hipótesis que relacione la regulación MAC con la expresión de los genes y el desarrollo de la forma animal. La mayoría de las pruebas acumuladas en nuestros estudios abonan la idea de que la modulación local de la superficie celular es un contribuyente principal de la morfogénesis. Se han identificado diversas MAC, que difieren en estructura, especificidad y modo de unión. La mejor estudiada, la N-MAC, presenta un mecanismo de unión homofílico; ni ésta ni la otra proteína nerviosa, la Ng-MAC, necesitan iones de calcio para establecer la unión. Por el contrario, H-MAC, que presenta una especificidad completamente distinta, depende del calcio para establecer la unión; no se ha demostrado aún de manera incuestionable que sea homofílica. Estas tres MAC son las únicas moléculas que, de momento, han logrado purificarse hasta su aislamiento. Sigue abierto el interrogante sobre el número total de MAC que existen, pero no parece probable que se precise un extenso repertorio (más de 100 MAC) de diferente especificidad, en tanto que los mecanismos de modulación y diferenciación celular alteren los efectos selectivos de las MAC sobre los patrones durante el curso del desarrollo.

El cuadro dinámico de la expresión MAC parece, por tanto, compatible con el modelo del torrente de alta montaña. Durante el desarrollo se produce una secuencia de expresiones de genes MAC, reversibles e irreversibles, coordinada con alteraciones epigenéticas de la expresión en superficie de diferentes MAC. Estos episodios ocurren en lugares específicos y en una secuencia determinada en los descendientes de ciertas células. Aunque se desconocen las señales causales de dichas expresiones diferenciales, entra dentro de lo razonable suponer que, en el curso de la evolución, la selección natural ha favorecido a los individuos en los que las MAC se expresaba en secuencias que generaban una forma funcional. Tales secuencias habrían de ser apropiadas para cada conjunto de células que tomara parte en la serie coordinada de movimientos morfogenéticos que condujeran a la inducción embrionaria; cualquier fallo de inducción resultante de una descoordinación entre la expresión MAC y los cambios de movimiento sería letal. La correlación observada de la sucesión de H-MAC a N-MAC con la presencia de diversas inducciones primarias, secundarias y recíprocas no puede ser accidental.

Tampoco sabemos si los episodios de adhesión intercelular afectan, por un mecanismo de realimentación, a los procesos fundamentales de la diferenciación o de la división celular de manera directa. Sí parece probable que ejerzan, cuando menos, efectos indirectos, variando la contribución proporcional de cada proceso primario a la morfogénesis. Por ejemplo, un acontecimiento morfológico fundamental en la embriogénesis, la transición de epitelio a mesénquima, puede explicarse mediante la modulación del predominio de las MAC, como ocurre en las células migratorias de la cresta neural estudiadas por Thiery. Concordes con la idea básica de que la expresión diferencial precoz de los genes MAC es necesaria para la morfogénesis, existen señales inequívocas para expresar genes de MAC secundarias, como Ng-MAC, en momentos críticos: justo antes de que se las requiera para efectuar interacciones heterotípicas en la histogénesis. Es notable que cada MAC persista en la vida adulta sólo en tejidos derivados de la capa germinal donde se expresó originalmente. No sorprendería encontrar que las alteraciones de las MAC estuvieran asociadas con una amplia variedad de procesos patológicos, por ejemplo la metástasis de las células cancerosas. Robert Brackenbury, Michael E. Greenberg y el autor han demostrado que N-MAC desaparece de las células nerviosas transformadas por infección de oncovirus.

Una hipótesis mínima sobre la base molecular de la morfogénesis debe tomar en consideración tres procesos fundamentales: adhesión, movimiento y diferenciación celular. (Se han reunido pruebas suficientes en distintas especies para mostrar que la división y la



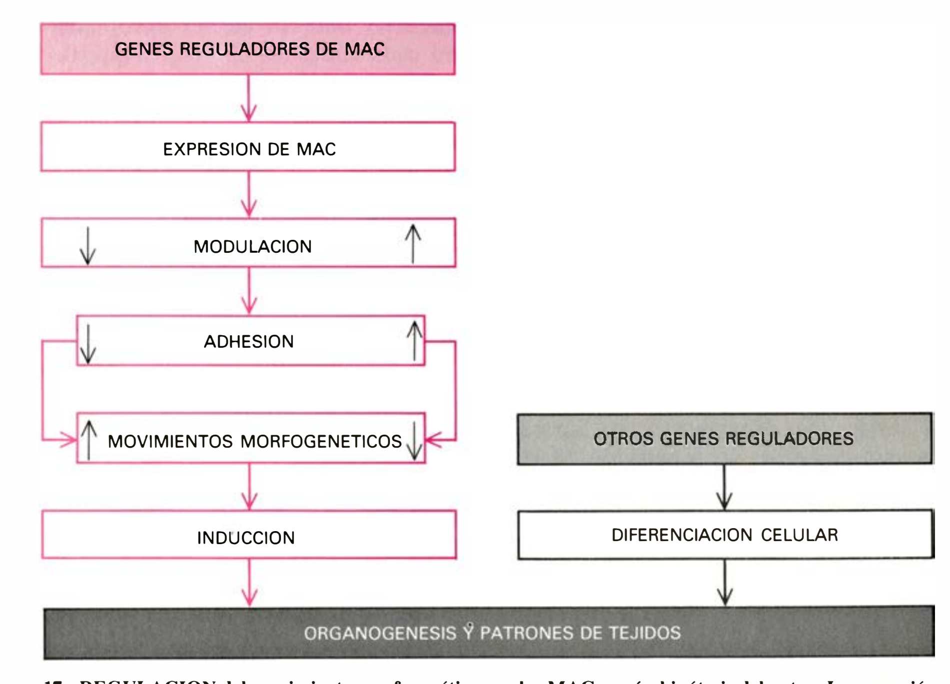
16. SECUENCIA TEMPORAL de la expresión MAC: se ajusta a una regulación a la vez genética y epigenética. N-MAC y H-MAC tienen distinta distribución celular. Su predominancia superficial va modulándose (a veces hasta la desaparición), particularmente en los lugares de inducción embrionaria. Durante la formación fina del tejido nervioso aparece una molécula de segunda generación, Ng-MAC. En el período perinatal se producen otras modulaciones epigenéticas, como es la conversión de *E* en *A*.

muerte celular desempeñan papeles importantes en determinados tipos de morfogénesis, pero está claro que la forma local puede, a veces, establecerse sin ellas.) La expresión precoz de las MAC primarias debe ser, en general, independiente de la diferenciación celular, porque una MAC primaria dada aparece en regiones inducidas que sólo más tarde formarán diferentes tipos celulares en órganos muy dispares. Por el contrario, a la expresión MAC le corresponde un papel directo en el control de los movimientos morfogenéticos, que resultan de la interacción de la motilidad celular, tensión de las capas hísticas y de la misma adhesión.

En la hipótesis reguladora hemos sugerido que los movimientos morfogenéticos que unen, en las inducciones embrionarias, células y tejidos con diferentes historias, determinando así los pasos sucesivos del proceso morfogenético, están regulados por las secuencias de expresión de las MAC. La síntesis de las MAC se diría regulada por un conjunto especial de mecanismos, independientes de los que posteriormente rigen la diferenciación celular. Se desconoce qué dispara los genes reguladores para las MAC; pero, cuando ello ocurre, las sucesivas series de modulaciones MAC limitan enormemente el movimiento celular y otros procesos básicos. Puesto que el desarrollo es histórico, puede esperarse, incluso, que las mismas secuencias de expresión de los genes de H-MAC y N-MAC originen nuevas estructuras en nuevos contextos de diferenciaciones celulares sucesivas.

Si la hipótesis reguladora se demuestra correcta, cabría explicar por qué diferentes especies de vertebrados tienen patrones de gastrulación, movimientos morfogenéticos y particularidades de sus mapas de destino distintos, y, no obstante, comparten un plan corporal básico. La razón propuesta es que la selección natural, en el transcurso de la evolución, permite la supervivencia de sólo los individuos en los que diversas combinaciones de movimientos morfogenéticos y expresiones de los genes MAC conducen a secuencias inductivas funcionales adecuadas.

Sin duda se descubrirán MAC y mecanismos de modulación nuevos, enriqueciendo y generalizando este esquema provisional de la relación entre adhesión y morfogénesis. Sabemos ya suficiente para afirmar que las moléculas de adhesión celular de diferente especificidad, que aparecen en distintos momentos del desarrollo como consecuencia de la expresión génica diferencial y de la modulación de superficie, pueden actuar como limitadores cinéticos sobre otros procesos primarios del desarrollo y ayudan, con ello, al establecimiento de la forma animal.



17. REGULACION del movimiento morfogenético por las MAC, según hipótesis del autor. La expresión de las MAC está controlada por un conjunto de genes. También se modula epigenéticamente. Todo ello para determinar cambios dinámicos de la adhesión celular, que afecta a aquellos movimientos morfogenéticos que conducen a la inducción de estructuras de órganos. Otro conjunto de genes regula la diferenciación celular, que interactúa dentro de estas estructuras para dar forma a los patrones de tejidos.

El comportamiento de nidificación de los dinosaurios

El descubrimiento de huevos de dinosaurio y de esqueletos de ejemplares jóvenes en dos yacimientos de Montana plantea una nueva interpretación de las relaciones sociales de esos reptiles

John R. Horner

Los dinosaurios son, sin duda, los animales fósiles que nos resultan más familiares. Se han recuperado miles de esqueletos parciales o completos en casi todos los continentes, esparcidos a través de estratos que vienen a representar unos 140 millones de años de historia de la Tierra. Tales fósiles han permitido inferir, con bastante precisión, la morfología de estos animales; lo que no puede afirmarse de su forma de vida ni de sus hábitos de comportamiento. Pero a lo largo de los últimos cinco años se han ido desenterrando esqueletos y huevos de dinosaurios en dos yacimientos de Montana, hallados en asociaciones que nos orientan sobre el posible comportamiento social de los tres tipos representados en la zona.

Empezaremos nuestro relato trasladándonos al continente norteamericano de hace 80 millones de años. Lo dividía en dos un mar somero, que ha recibido el nombre de Mar Cretácico Interior Occidental. Las Montañas Rocosas, recién formadas, junto a unos pocos sistemas volcánicos aislados, constituían la topografía de las tierras altas de "América Occidental"; las montañas de los Apalaches formaban las tierras más elevadas de la "América Oriental".

Desde el borde oriental de las Rocosas hasta la costa occidental del mar se extendía una amplia llanura costera; se depositaban allí los sedimentos que generaba la erosión de las montañas. En lo que actualmente es Montana y Alberta meridional, la llanura alcanzaba una anchura de hasta 400 kilómetros, aunque fluctuaba según los cambios que experimentara el nivel del mar. A lo largo de la costa, y extendiéndose cierta distancia tierra adentro, veíanse largos ríos, deltas fluviales, pantanos y marismas, que presentaban una densa vegetación, seguramente muy semejante a la que hoy impera en la costa meridional de Louisiana. Cipreses calvos, secoyas y numerosos árboles de hoja ancha crecían bajo un clima subtropical y húmedo.

En este ambiente medraban peces, anfibios, tortugas acuáticas, cocodrilos y pequeños mamíferos primitivos. También había dinosaurios, representados principalmente por hadrosaurios (dinosaurios de pico de pato), ceratópsidos (dinosaurios cornudos) y numerosos carnosaurios, pequeños y grandes. Puesto que se tiene constancia de que en el lugar vivían dinosaurios, llama la atención que los sedimentos encierren sólo restos raros y fragmentarios de huevos y de ejemplares jóvenes. Los restos que se encuentran parecen proceder de otra zona, donde se habrían fragmentado y de la que habrían sido arrastrados.

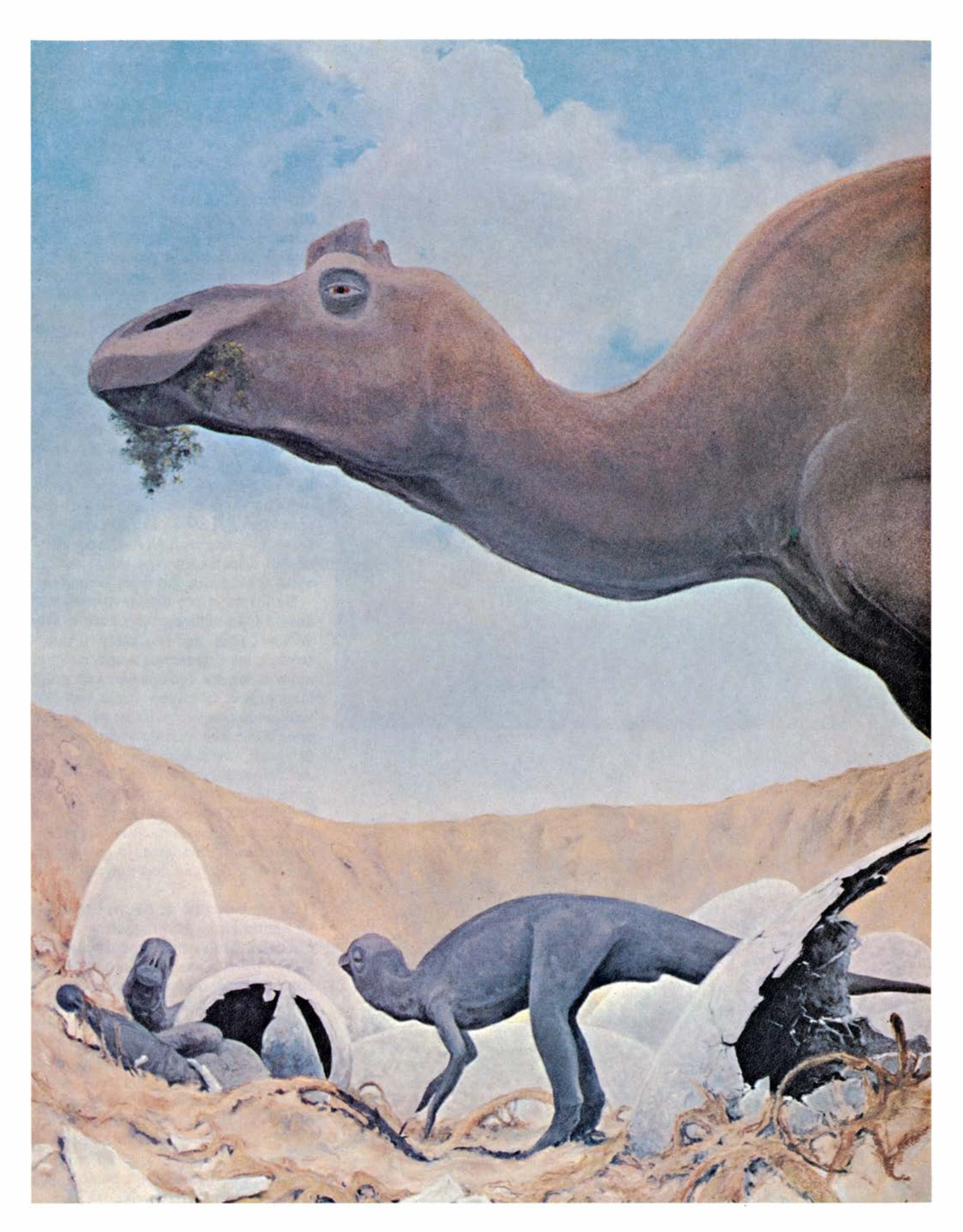
La escasez de tales fósiles en regiones habitadas, con toda seguridad, por adultos es tan paradójica que varios paleontólogos han emitido hipótesis para explicarla. Aventuraron algunos que los dinosaurios anidaban en zonas más expuestas a la erosión que a la deposición. Otros sostuvieron que los dinosaurios debían anidar en regiones muy alejadas de la llanura costera (lo que viene a ser más o menos lo mismo). Hubo quienes sentenciaron que los dinosaurios debían ser de vida muy larga, por lo que, para mantener una población adulta de un determinado tamaño, se precisarían pocos jóvenes.

El problema se hubiera resuelto hace tiempo si Charles W. Gilmore, paleontólogo de la Institución Smithsoniana en los primeros años de este siglo, hubiera apreciado en todo su valor el significado de uno de sus propios descubrimientos. Gilmore recolectó muchos ejemplares procedentes de rocas del Cretácico tardío de Montana occidental, conocidas como la formación Two Medicine. En sus notas de campo mencionó la abundancia de fragmentos de huevos de dinosaurios. Es más, muchos de los fósiles de dinosaurio que recolectó y describió como especies nuevas han resultado representar juveniles de especies reconocidas en sedimentos situados mucho más hacia el este.

Los sedimentos de Two Medicine difieren de aquellos en los que se encuentran los restos de dinosaurios adultos. Se depositaron junto a las jóvenes Rocosas, en los canales de arroyos trenzados y en los cursos de inundación de los mismos cursos. También se depositaron grandes cantidades de sedimentos en lagos. Las rocas nos dicen que dominaba el clima seco en determinadas épocas del año. Dentro de los múltiples restos animales hallados, sorprende la abundancia de huevos de dinosaurio, completos o fragmentados, y los esqueletos de dinosaurios juveniles. Los fragmentos de cascarón son los fósiles más comunes de los sedimentos, y cerca del 80 por ciento de los restos esqueléticos de dinosaurios lo son de ejemplares juveniles.

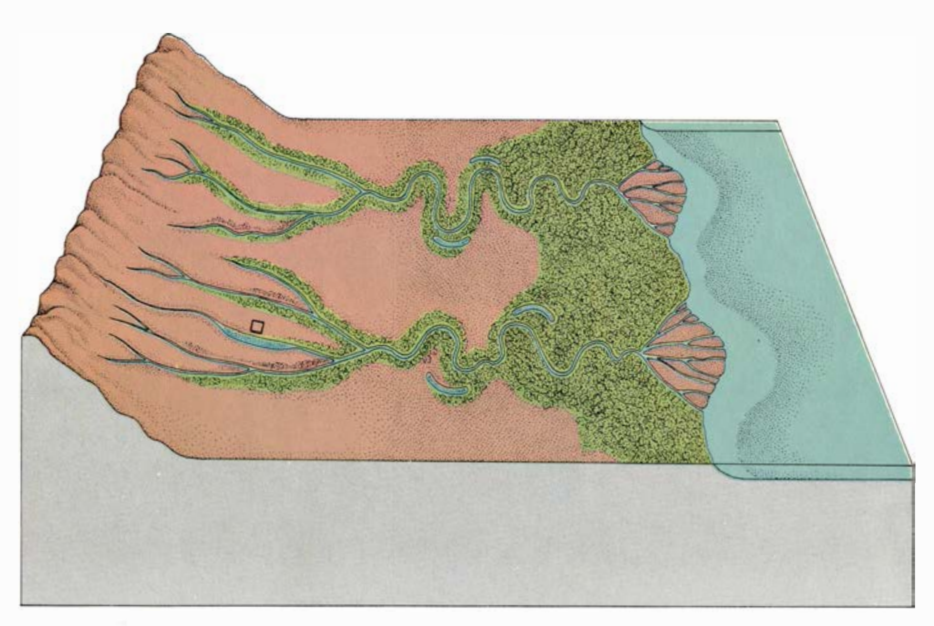
Debe tenerse en cuenta que la formación Two Medicine tiene 650 metros de potencia y posee diversas provincias sedimentarias, que representan varios ambientes. El lugar en el que he centrado mis propias investigaciones corresponde sólo a un ambiente; la zona donde trabajó Gilmore corresponde a otro. Aunque los dos ambientes poseen más características en común que las que comparten con los ambientes situados al este, no son idénticos.

Trabajé en el llamado anticlinal de Willow Creek, que no llega a los dos kilómetros de diámetro y posee unos



1. HADROSAURIOS JUVENILES (dinosaurios de pico de pato) recién salidos del cascarón, recogidos en esta escena imaginaria de un nido, realizada por Doug Henderson en estrecha colaboración con el autor. Según éste último, las pruebas que él y sus colaboradores han desenterrado indican que los dinosaurios jóvenes permanecían en el nido hasta alcanzar la edad suficiente para aventurarse al exterior y acompañar a los adultos en la búsqueda de alimento. Hasta ese momento, las semillas, bayas, maleza y otras formas de vegetación aportadas al nido por uno o ambos progenitores compondrían la dieta básica de los indefensos juveniles. El animal recién salido del huevo tenía aproximadamente 30 centímetros de longitud; el adulto, siete metros.





2. MAR SOMERO que cortaba en dos el continente norteamericano durante el período Cretácico, hace unos 80 millones de años. La amplia llanura costera que se extendía desde el borde oriental de las Montañas Rocosas, recién levantadas, hasta la costa occidental del mar interior estaba habitada por muchas especies de animales primitivos; entre ellos figuraban los dinosaurios cuyos restos fosilizados se encontraron recientemente en las proximidades del anticlinal de Willow Creek, en Montana occidental, la zona incluida dentro del pequeño rectángulo del mapa superior. El lugar de los descubrimientos se muestra con más precisión en la vista en perspectiva ampliada del paisaje cretácico del oeste americano, abajo.

150 metros de sección vertical expuesta. El yacimiento, descubierto en 1978 por Marion Brandvold, paleontóloga aficionada de Bynum, Montana, resultó ser un nido de hadrosaurios juveniles. Durante los últimos cinco años, las campañas realizadas por las universidades de Princeton y estatal de Montana, financiadas en parte por la National Science Foundation, han recuperado restos de cerca de 300 huevos de dinosaurio, completos o parciales, atribuidos a tres especies distintas por lo menos; restos de más de 60 esqueletos completos o parciales de dinosaurios; numerosos restos de saurios y tortugas; un gran pterosaurio (un "lagarto volador") y abundantes restos de invertebrados terrestres. A diferencia de otros muchos lugares en los que se han encontrado restos de dinosaurios, la mayoría de los huevos conservan en este yacimiento la posición exacta en la que se pusieron, y, la mayoría de los esqueletos, la posición y la situación aparente en la que el animal murió. Los restos no parecen haber sido perturbados o dispersados por corrientes de agua, salvo en un punto del yacimiento.

De los tres tipos de huevo encontrados en los sedimentos del anticlinal de Willow Creek, uno se atribuye a hadrosaurios: los fragmentos aparecieron en nidos asociados a jóvenes de este grupo taxonómico. El huevo, según se ha determinado por su reconstrucción, tenía unos 20 centímetros de longitud y una forma elipsoidal asimétrica. De superficie almenada, con aristas, sus áreas deprimidas se orientaban a lo largo de la longitud del huevo. La mayor parte de los fragmentos se encuentran formando disposiciones circulares, lo que sugiere que así se ponían los huevos en los nidos.

El segundo tipo de huevo tiene unos 15 centímetros de longitud y es más alargado, con estriaciones, apenas visibles, orientadas longitudinalmente. Estos huevos, que pertenecen a un primitivo dinosaurio bípedo similar a *Hypsilophodon*, se encuentran en puestas circulares de hasta 24 unidades por nido. El diámetro de las nidadas viene a alcanzar un metro. Los huevos se disponen con su extremo más estrecho hacia abajo, ya sea vertical u oblicuamente sobre el sedimento. Se distribuyen de tal manera que no se tocan entre sí, salvo los que muestran signos claros de haberse ladeado.

El tercer tipo de huevo es de origen desconocido. Tiene unos 10 centímetros de longitud y una forma elipsoidal más regular. La superficie es nodular, es decir, con protuberancias, sin que las



3. ZONA DE NIDIFICACION DE HADROSAURIOS en el anticlinal de Willow Creek, escudriñada por miembros del grupo del autor para recuperar cualquier posible fragmento de cascarón y de parte esquelética que se halle en la superficie o cerca de ella. Los círculos de color son lugares de nidificación.

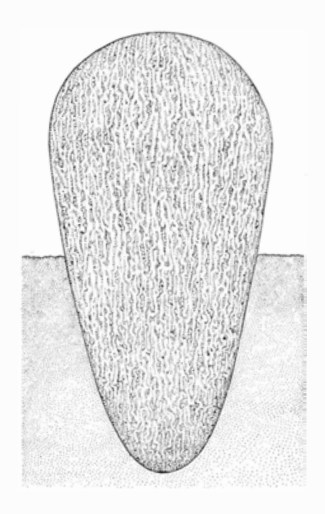
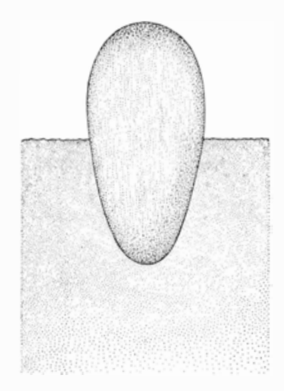
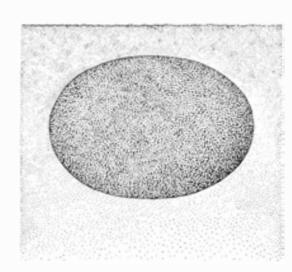
áreas deprimidas presenten una orientación preferida aparente. Los huevos de este tercer tipo se encuentran tumbados horizontalmente en filas lineales pares. Diríase que los huevos han permanecido completamente recubiertos de sedimento, mientras que los de los nidos circulares sólo quedaron enterrados parcialmente.

Richard Mellon, a la sazón estudiante en Princeton, examinó las distintas estructuras superficiales en relación con la disposición de los huevos en puestas. En su opinión, las estructuras superficiales serían adaptaciones para la liberación de gas. El metabolismo de un embrión libera dióxido de carbono a través de los poros del huevo. Cuando éste se halla parcial o completamente cubierto por el sedimento, sin embargo, debe existir algún camino para que el gas salga del huevo y llegue a la superficie. Las denticulaciones y los nódulos podrían servir a tal fin, al mantener el sedimento alejado de los poros.

¿Por qué razón algunos huevos tenían denticulaciones y estriaciones orientadas y otros presentaban textura nodular sin una orientación preferente? Mellon señaló que los huevos elipsoidales asimétricos se encontraban siempre más o menos erguidos en nidos circulares, y que éstos eran los huevos con denticulaciones o estriaciones. Los huevos pequeños, como los que se atribuyen a los hipsilofodontos, quizá no tuvieran suficiente superficie en contacto con el sedimento para necesitar más que estriaciones de relieve somero. Los huevos de hadrosaurio, de extensa superficie, precisarían mayor relieve para una liberación eficaz del gas. Los huevos que se hallaban completamente cubiertos por el sedimento habrían requerido, en todo caso, estructuras superficiales, al margen de su tamaño. Grandes huevos encontrados en Francia y atribuidos al brontosaurio *Hypselosaurus* presentan una superficie nodular similar. (También parecen haber sido puestos en fila recta.)

Todas las puestas atribuidas a dinosaurios son circulares o lineales. ¿Por qué? La respuesta quizá guarde relación con la estructura social de cada especie.

Las puestas circulares concentraban los huevos en una pequeña zona; la oviposición lineal dispersaba los huevos sobre una zona mayor. Si, como los indicios sugieren, las puestas circulares se hallaban sólo parcialmente cubiertas de

4. TRES TIPOS DE HUEVOS DE DINOSAURIOS de los que se encontraron en los yacimientos de Montana. La gran forma ovoide de la izquierda es una reconstrucción de un huevo de hadrosaurio, basada en fragmentos de huevos recuperados de nidos asociados a los restos esqueléticos de hadrosaurios juveniles. Mide unos 20 centímetros de longitud y posee sobre su superficie crestas prominentes, orientadas longitudinalmente. El huevo algo más pequeño y más alargado del centro perteneció, presumiblemente, a un primitivo dinosaurio bípedo, un hipsilofodonto. Presenta estriaciones longitudinales menos prominentes. El de la derecha, de origen desconocido, ofrece una superficie nodular. Los huevos de los dos primeros tipos se encuentran en una posición erguida y sólo parcialmente enterrados en el sedimento; los del tercer tipo suelen reposar horizontalmente en filas lineales pares y cubiertos por el sedimento.

sedimento, los padres (o uno de ellos) habrían de atenderlos: incubarlos y protegerlos de los depredadores. La atención acarrearía al progenitor un gasto energético considerable, pero la tasa de supervivencia de los huevos sin duda mejoraría con esa conducta.

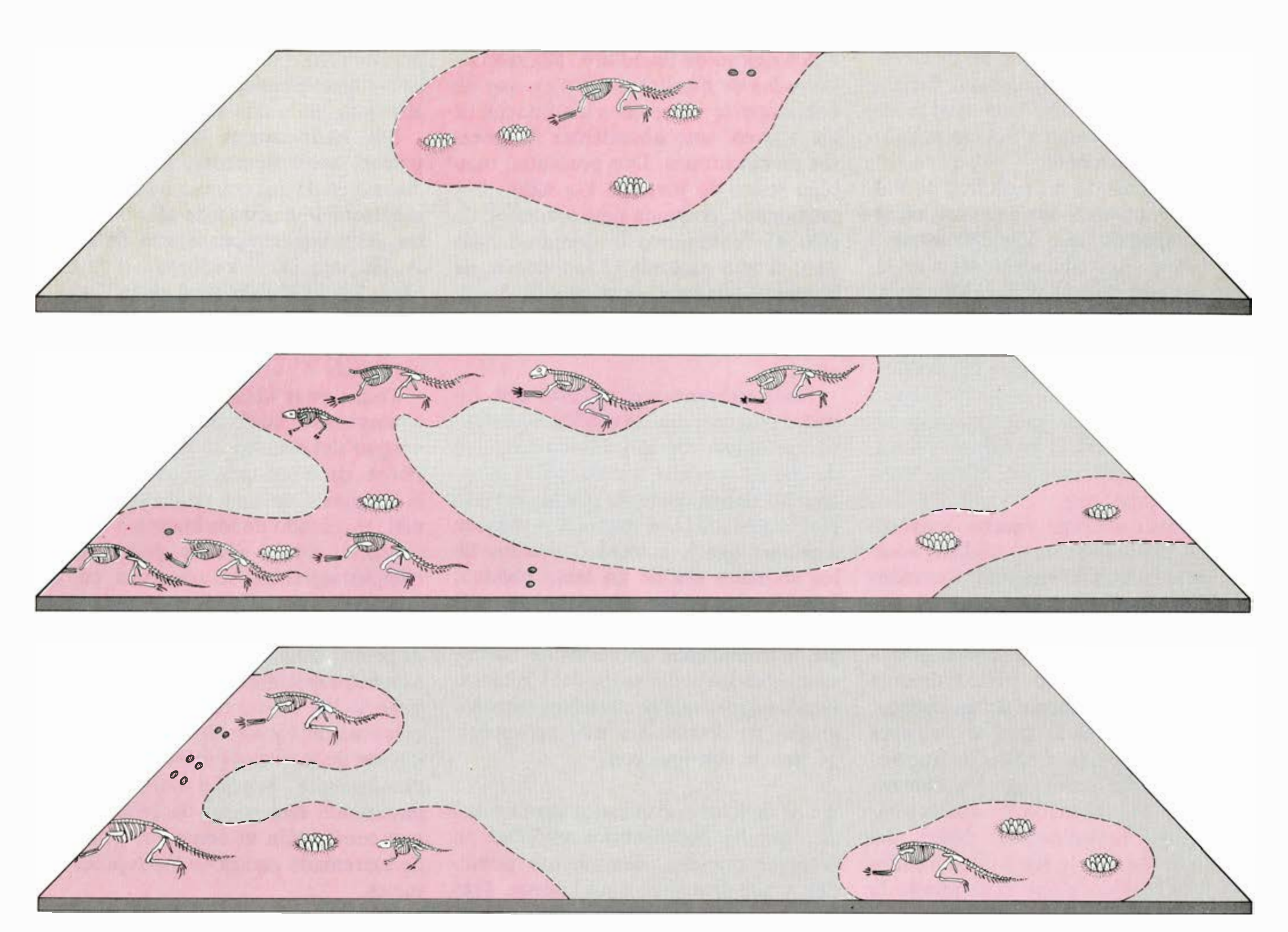
La incubación de los huevos en puestas circulares probablemente exigía cubrir la parte expuesta de los huevos con material vegetal; es algo que hacen muchos cocodrilios modernos y muchas aves que anidan en el suelo. El material vegetal en descomposición fermenta, generando calor que puede regularse mediante la adición o la remoción de material. Los huevos puestos en disposición lineal no recibirían más incubación que el caldeamiento del suelo debido al sol. Probablemente tenían un menor éxito de eclosión, porque su incubación dependía de factores meteorológicos. Debe señalarse que muchos de los huevos dispuestos en filas nos han llegado sin eclosionar, mientras que la mayoría de los huevos de las puestas circulares parecen haber hecho eclosión.

Conviene destacar también que los nidos de una especie de la zona del anticlinal de Willow Creek reuníanse, por lo que se infiere, en grupos o colonias. Las puestas de huevos de los hipsilofodontos, por ejemplo, aparecen de forma exclusiva en dos pequeñas colinas (que jocosamente se han bautizado con los nombres de Egg Mountain y Egg Island: Montaña e Isla de los Huevos, respectivamente). En Egg Mountain, todos los nidos se hallaron en el interior de una zona de unos 70 metros de diámetro. Se recuperaron en tres horizontes sedimentarios distintos, donde se distribuían a través de una sección vertical de tres metros. Los nidos de cada horizonte aparecieron a una distancia mutua de unos dos metros. Puesto que los dinosaurios adultos de esa especie medían unos dos metros de longitud, revela una estrecha vecindad entre nidos. La presencia de éstos en distintos horizontes prueba que la zona sirvió para ese menester a lo largo de un período de varios años.

Los restos esqueléticos encontrados en el lugar corresponden a 20 o 25 hipsilofodontos de distintas edades. Los restos de individuos recién salidos del huevo no se encuentran en los nidos, sino dispersos entre ellos. La parte inferior de los huevos aparece intacta y sin aplastar, por lo que es muy improbable que el cuidado de los jóvenes se hiciera en el nido mismo; si así hubiera sido, las cáscaras de los huevos estarían rotas. ¿Por qué razón se encuentran, entonces, individuos de diversos tamaños en la zona de los nidos? Si los jóvenes salían del huevo y abandonaban la zona, sería verosímil que un par de individuos muriera casualmente antes de alejarse, pero resulta muy improbable que murieran así 20 o 25 individuos. Quizá los jóvenes permanecían en la zona en grupos, como hacen algunas aves que anidan en el suelo. Los sedimentos sugieren que, durante la época en que sirvió para nidificar, la zona se hallaba sobre una península, que penetraba en un gran lago, o bien sobre una isla. Quizás el alimento de los jóvenes dinosaurios podía obtenerse fácilmente del lago, por lo que no habría necesidad alguna de que los animales extendieran su área de alimentación.

Egg Mountain se está excavando horizonte a horizonte, lo que permite identificar las comunidades animales que habitaban el lugar en cada período. En los sedimentos adyacentes a la mayoría de los nidos de hipsilofodontos

5. PUESTA DE 24 HUEVOS, extraída intacta de un nido de hipsilofodonto en una pequeña colina, Egg Mountain. Se muestra la parte inferior de los huevos. La escala mide cinco centímetros de longitud.



6. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE EGG MOUNTAIN, que revela varios niveles de nidos de dinosaurios y restos esqueléticos. Las zonas de color muestran la extensión de las excavaciones; las zonas grises todavía están recubiertas por sedimentos, o bien han sido erosionadas. Los grupos circulares de huevos de las depresiones someras son puestas de hipsilofodontos. Los pequeños óvalos negros son los huevos de algún dinosaurio de origen desconocido. Los esqueletos de largas extremidades posteriores constituyen restos de hipsilofodontos. Otros corresponden a lagartos, posiblemente depredadores.

se recuperan grupos de pequeñas estructuras ovoideas y oblongas, parecidas a las pupas de los actuales escarabajos carroñeros. Si en verdad se trata de esos animales, sin duda los escarabajos se alimentaban de los dinosaurios que morían al poco de abandonar el huevo, así como de otros cadáveres, y probablemente de los fluidos que quedaban en los huevos después de la eclosión.

Se encuentran asimismo restos de saurios depredadores. Los más comunes son varánidos, tipo de lagartos que en la actualidad han sido vistos excavando y robando huevos de crocodilios y de aves que anidan en tierra. Los saurios probablemente fueran depredadores importantes de los huevos todavía no eclosionados de los dinosaurios. Ocasionalmente se encuentran restos de *Troodon*, un pequeño dinosaurio carnívoro que quizá comiera jóvenes hipsilofodontos.

Característica casi exclusiva de Egg Mountain es también la disposición en filas de los huevos. Aunque se han recogido muchos huevos, no puede precisarse a cuántas puestas corresponden, precisamente por la insólita dispersión que muestran. Puede que la disposición lineal sea un rasgo que distinga a los dos órdenes de dinosaurios: los Ornitisquios (principalmente herbívoros) y los Saurisquios (sobre todo carnívoros). Los hipsilofodontos, los dinosaurios de pico de pato, los dinosaurios cornudos y otros pertenecen al orden Ornitisquios, mientras que los dinosaurios carnívoros y los brontosaurios son saurisquios.

Huevos que se atribuyen al dinosaurio cornudo *Protoceratops* (de Mongolia) se encuentran en nidos circulares, como los atribuidos a los hipsilofodontos. Los datos procedentes de la estructura de la cáscara y de la forma del nido sugieren que los nidos de los hadrosaurios eran también circulares. El brontosaurio *Hypselosaurus*, que se encuentra en Francia y es un saurisquio, parece que ponía sus huevos en filas. Cabe aventurar, por tanto, que los ornitisquios pusieran sus huevos en puestas circulares y, en filas, los saurisquios. Quizá los huevos de Egg Mountain que presentan una disposición lineal sean de *Troodon* que, pequeño saurisquio depredador, habría conseguido una ventaja excepcional al eclosionar en el área de anidamiento de dinosaurios no depredadores.

Egg Island, como su nombre indica, está completamente rodeada por sedimentos lacustres. Aunque el lago no debió ser muy profundo, incluso puede que se secara más de una vez durante el tiempo en que la isla sirvió de lugar de anidamiento para los dinosaurios, probablemente proporcionara cierto grado de protección frente a los depredadores. El yacimiento se descubrió en la última semana de trabajo de campo de 1983, por lo que se ha excavado menos que Egg Mountain. Sin embargo, ya ha proporcionado tres puestas de huevos de hipsilofodontos en dos horizontes distintos. Una de las puestas la forman 19 huevos no eclosionados, cada uno de los cuales contiene

los restos esqueléticos de un embrión. Los esqueletos, del mismo tamaño todos, sugieren que los huevos se pusieron al mismo tiempo y debían eclosionar simultáneamente.

Otro yacimiento del anticlinal de Willow Creek promete ser más rico, en algunos aspectos, que Egg Mountain y Egg Island. Aproximadamente a un kilómetro de distancia de Egg Mountain, en sedimentos de llanura de aluvión que se depositaron antes, se encuentran los restos de un área de nidificación de hadrosaurios. Hasta hoy día se han encontrado ocho nidos; todos parecen corresponder a la misma época, pues se encuentran en el mismo horizonte sedimentario.

Los hadrosaurios, mucho mayores que los hipsilofodontos, medían, adultos, siete metros de longitud. Sus nidos también eran mayores: cerca de dos metros de diámetro por uno de profundidad. Parecen haberse construido a cierta altura del suelo, principalmente de fango. Con la forma de un cuenco, se diseñaron, por lo que se ve, para contener una puesta circular de huevos. El tamaño del nido y de los huevos, junto con la suposición de que los hadrosaurios disponían sus nidos del mismo modo que lo hacían los hipsilofodontos, sugieren que cada puesta la integraban de 20 a 25 huevos.

Los nidos de los hadrosaurios, como los construidos por los hipsilofodontos, se hallaban muy próximos entre sí: estaban separados por un intervalo igual a la longitud de un adulto. Difieren de los nidos de hipsilofodontos en que no contienen la parte inferior intacta de los huevos, sino abundantes fragmentos de cascarones. Dos presentan también restos de jóvenes. Un nido, muy erosionado, contenía siete juveniles, de sólo 45 centímetros de longitud cada uno; el otro contenía 15 individuos, de aproximadamente un metro de longitud cada uno. (El hadrosaurio salía del huevo con 30 a 35 centímetros de longitud.)

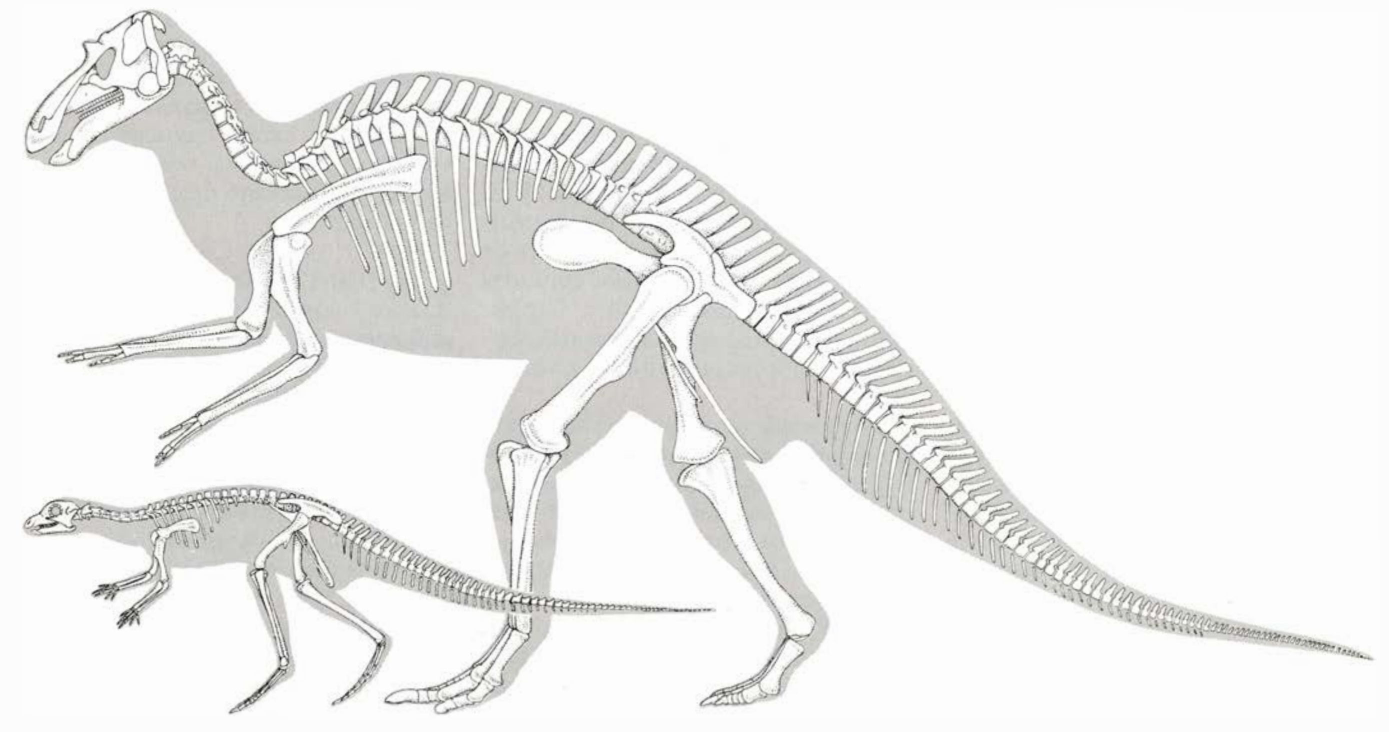
Los hadrosaurios eran herbívoros bípedos que carecían de medios de defensa aparentes, con la posible excepción de cocear y patear con sus patas traseras. No tenían cuernos, placas, astas ni piel acorazada. Los esqueletos inducen a pensar que la velocidad máxima de los animales era de un lento anadeo. Los jóvenes serían especialmente vulnerables a la depredación. Sin embargo, la abundancia de restos de hadrosaurios en los sedimentos del Cretácico tardío sugiere que se contaban entre los grupos de dinosaurios más prósperos. ¿Cómo lo consiguieron?

Los indicios encontrados manifiestan que los hadrosaurios anidaban en colonias grandes, densamente pobladas, y que protegían a sus huevos. Tras la eclosión, los adultos permanecían en la colonia para proteger y alimentar a sus crías respectivas. Al igual que las aves altrices, o nídicolas, cuyas crías también nacen desvalidas, los juveniles permanecían en el nido hasta que eran lo bastante grandes para ir en busca del alimento junto con los adultos.

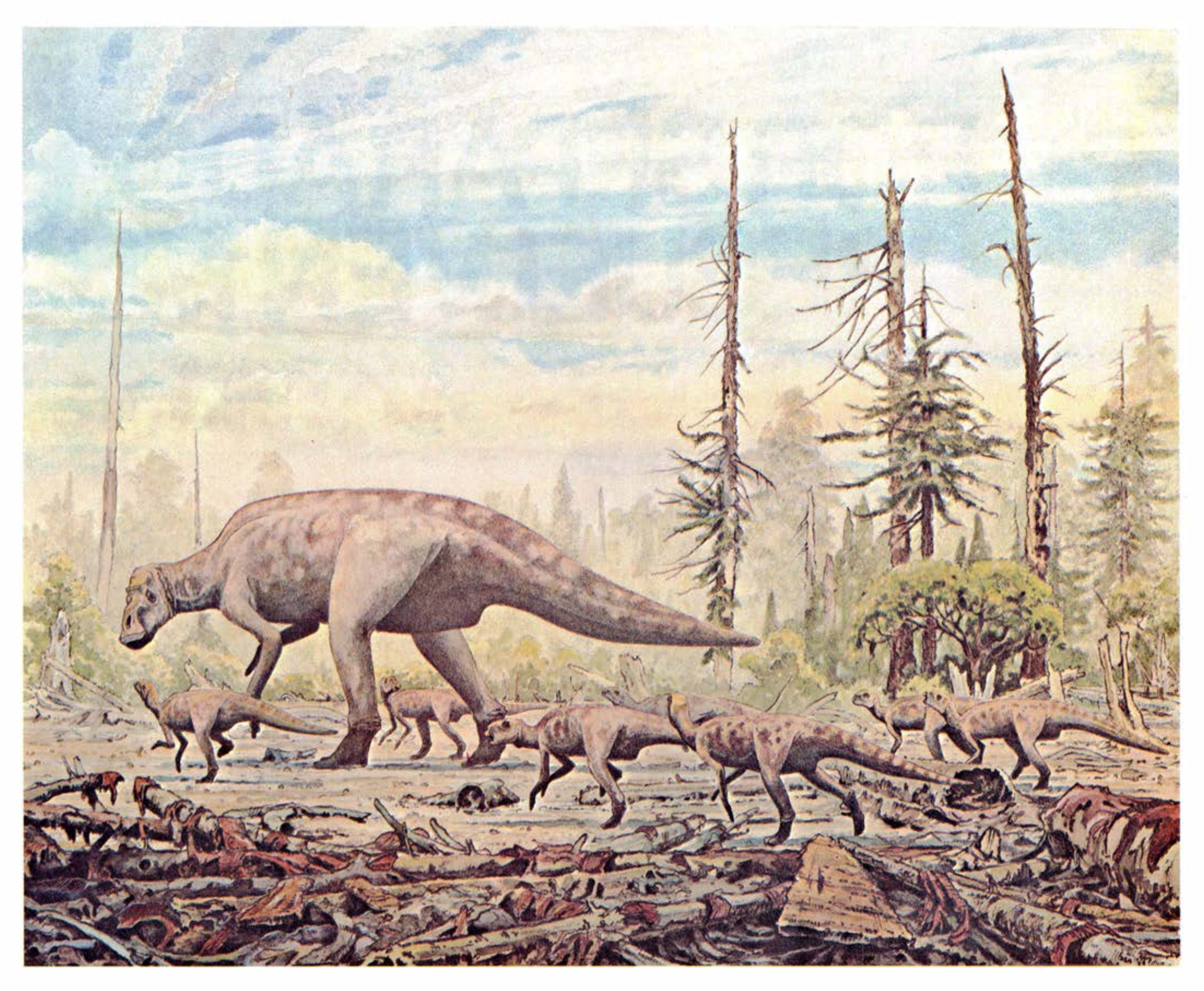
Los hadrosaurios adultos también podían, aparentemente, alertar a otros miembros de una colonia o una manada mediante la emisión de alarmas vocales. Estudios independientes de James A. Hopson, de la Universidad de Chicago, David Weishampel, de la Universidad Internacional de Florida, y míos propios aportan pruebas de que podían vocalizar.

Todas estas ideas quizá no ganen la aquiescencia unánime de cuantos se ocupan del estudio de los dinosaurios. Pocos, cabe presumirlo, se opondrán a la hipótesis de una nidificación colonial, al cuidado de los huevos o a la vocalización en los adultos, porque estos comportamientos se observan en los crocodilios actuales. Pero compartir la comida es ya otra cuestión, documentada principalmente en aves y mamíferos. Muchos especialistas creen que se atribuye a los dinosaurios una fisiología más compleja y más tipos de comportamiento de lo que es probable que tenga ningún reptil, actual o extinguido. Seguramente rechazarán la hipótesis de que compartían el alimento, proceder de extremada rareza en los reptiles actuales.

De lo que se trata es de averiguar si los reptiles actuales son incapaces de éste y otros comportamientos, o de si, llanamente, no los necesitan. Muchos especialistas creen que los comporta-



7. RECONSTRUCCIONES ESQUELETICAS de un hadrosaurio y de un hipsilofodonto adultos, dibujados a la misma escala en esta ilustración. En contraste con el hadrosaurio, cuya velocidad máxima probablemente fuera un pausado anadeo, el hipsilofodonto parece haber sido un corredor veloz.



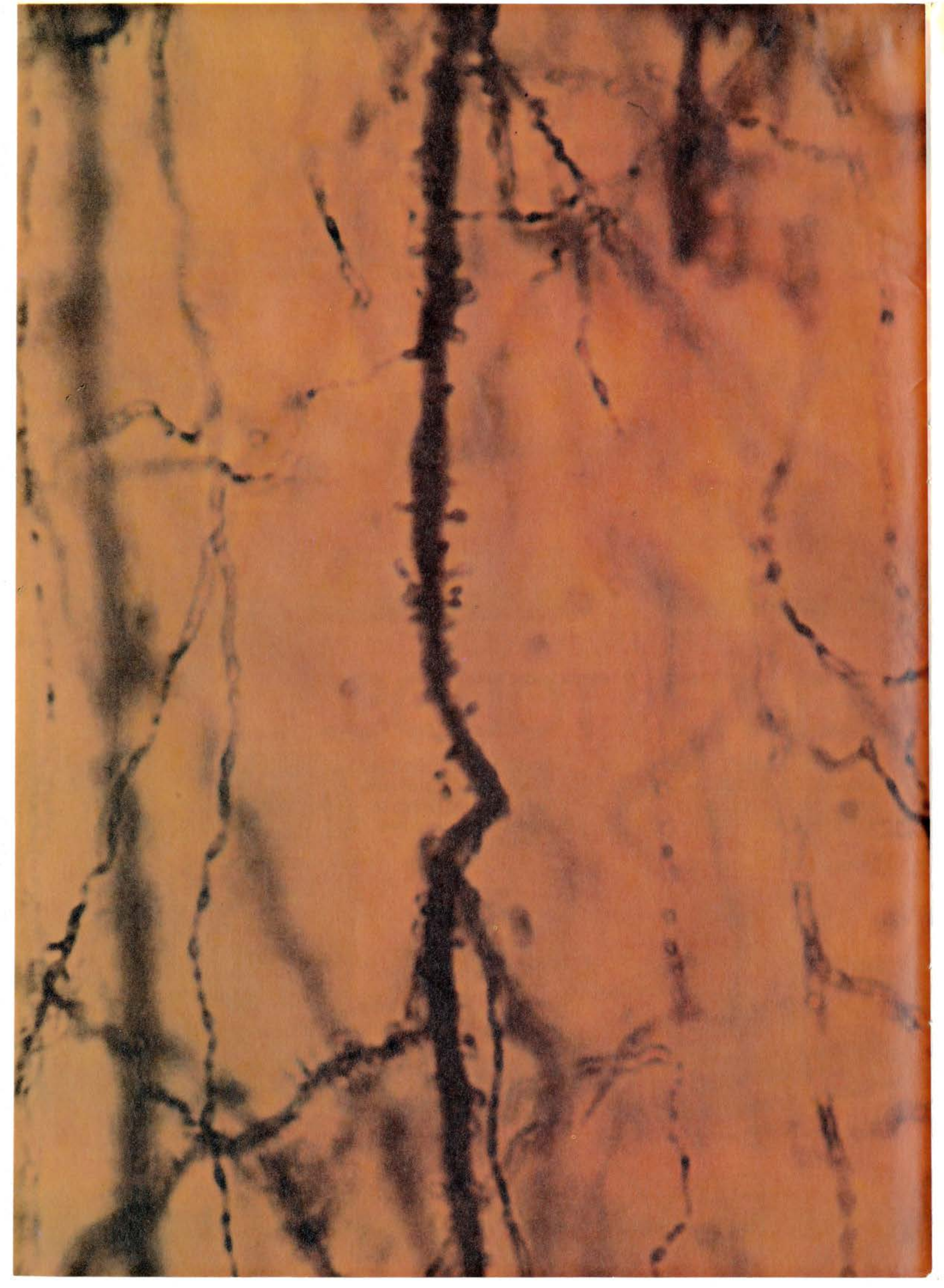
8. JOVENES HADROSAURIOS acabados de salir del nido; se ilustran aquí en busca de comida, acompañados por un progenitor, presumiblemente la hembra. El ramoneo debía hacerse también junto con otros miembros de la manada. La ilustración, una litografía con acuarela, es de Henderson.

mientos básicos pasan de una generación a otra a través de los genes. Aunque un animal no exhiba un determinado comportamiento básico, quizá lo manifieste si surge la necesidad de ello. En este sentido, los crocodilios podrían compartir el alimento, pero no tienen necesidad de hacerlo. Los crocodilios son depredadores y agresivos, incluso en su fase juvenil. Los jóvenes dinosaurios herbívoros, como los hadrosaurios, no se mostraban agresivos; antes bien, resultaban muy vulnerables a múltiples depredadores. Los padres, además de compartir el alimento con las crías, habrían de prestarles una vigilante atención.

Los sedimentos del anticlinal de Willow Creek prueban también que los hadrosaurios permanecían en rebaños o alguna otra forma de agregación social durante buena parte de su vida, si no toda. En seis localidades distintas, los restos revelan una asociación entre adultos y juveniles. La ausencia de juveniles con longitudes superiores a la mitad de la que alcanzan los adultos sugiere que quizá los individuos subadultos (de tres a seis metros de longitud) abandonaran el grupo para vagar por otras zonas.

Aunque estas interpretaciones son, hasta cierto punto, conjeturales, pretenden apoyarse en los indicios encontrados en los yacimientos y en la lógica. La mera presencia de jóvenes hadrosaurios del mismo tamaño en los nidos implica una situación muy distinta de cualquiera que pudiera explicarse mediante transporte por una corriente de agua. Los jóvenes parecen haber muerto en el lugar; no muestran signo alguno de haber sido presas de otros animales. Si las crías de aves altrices son abandonadas por su progenitor o progenitores, mueren de hambre. De no recibir alimento en el nido, la mortalidad de las crías de hadrosaurios habría sido muy elevada. Los esqueletos de los animales acabados de salir del huevo difieren de los correspondientes a los adultos sólo en tamaño, por lo que no cabe suponer que estuvieran dotados de una carrera más rápida o de otras maniobras defensivas. Es muy probable que el éxito juvenil se explique porque los adultos alimentaban a las crías desde el borde del nido, con la protección adicional que proporcionaba la densa colonización. La formación de rebaños sería un paso más de su comportamiento de agregación.

En cuanto a los hipsilofodontos de Egg Mountain, tal vez no exigieran la alimentación en el nido. La morfología esquelética nos los prefigura como corredores rápidos. Su defensa principal contra los depredadores sería una huida veloz.



Modelos matemáticos en biología

Los modelos matemáticos de sistemas biológicos o conjunto de ecuaciones que describen de manera coherente la estructura y función de los mismos constituyen un nuevo medio eficaz para profundizar en el conocimiento de estos sistemas

Antonio Ruiz Marcos

La perfección que los sistemas y procesos biológicos presentan en su estructura y función nos induce a pensar que se desarrollan con un cierto orden, y no meramente al azar. Si suponemos válida esta premisa y aceptamos que una de las formas más directas que hoy posee la ciencia para expresar un orden es a través de las matemáticas, parece razonable concluir que la estructura y función de los sistemas biológicos debe poder expresarse mediante modelos matemáticos, o conjunto de ecuaciones que explican de manera coherente el comportamiento de un sistema determinado.

La enorme complejidad que caracteriza a los sistemas biológicos ha constituido siempre un freno para los estudios encaminados a expresar de forma matemática las leyes que rigen su comportamiento, de manera similar a como se ha venido haciendo en el estudio de los sistemas físicos. Tarea que, todavía hoy, resulta imposible de acometer en muchos casos. Sin embargo, la aparición de los ordenadores electrónicos, máquinas que permiten manejar simultáneamente muchos valores de variables y realizar muchas operaciones en un tiempo muy corto, ha ayudado mucho a este tipo de estudios.

Para la comprensión de lo que sigue conviene tener presente la diferencia que existe entre lo que es un modelo matemático y un simple algoritmo matemático. Por este último entenderemos aquí un conjunto ordenado de operaciones, estructuradas en fórmulas, que nos sirve para solucionar un problema concreto. Y llamamos modelo matemático al conjunto de ecuaciones que nos ayudan a profundizar en las propiedades del sistema que describe, permitiéndonos incluso predecir las propiedades de nuevos estados.

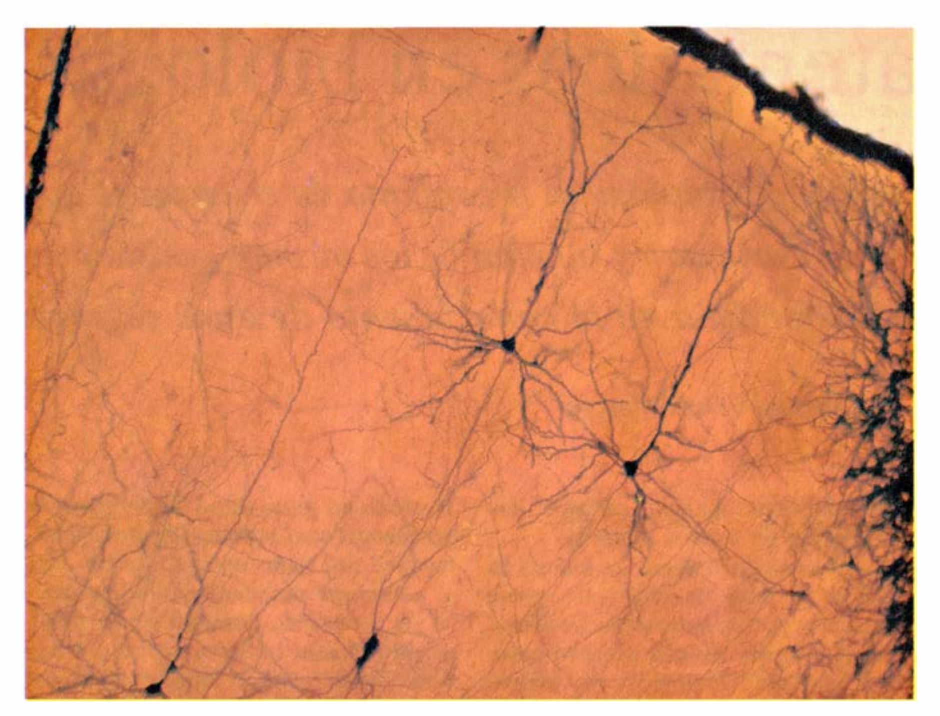
Debe también tenerse en cuenta la relación (o falta de ella) que existe entre los procesos naturales y las matemáticas. No hay ningún proceso natural, y por tanto biológico, por simple que sea, cuyo comportamiento pueda ser descrito de una manera exacta mediante una ecuación matemática. Pensemos en uno de los procesos que se realizan en la naturaleza con gran precisión: la caída o descenso con el tiempo de la actividad de una muestra radiactiva. Aunque puede probarse, de manera teórica, que esta caída se produce de forma exponencial, siempre encontraremos un desajuste entre la línea que representa la ecuación teórica exponencial y la que obtenemos al unir el resultado de las medidas que realicemos para comprobarlo.

Los científicos atribuyen esa diferencia a la imperfección del sistema de medida, o a la del propio investigador que las toma, definiéndola como ruido. (La bioestadística tiene varios procedimientos que nos permiten saber las cotas de ruido permitidas para poder aceptar el modelo teórico como buena representación del proceso natural descrito.)

La abstracción, por otra parte, es absolutamente necesaria para realizar el tipo de estudio de que trata este artículo. Recordemos, por un momento, el hecho de que cargas eléctricas de signo opuesto se atraigan mutuamente. Nadie sabe por qué esto es así. Más aún, se desconoce qué sea una carga eléctrica; nadie vio jamás un electrón, ni siquiera un protón, con ser mucho mayor; su existencia se deduce de los efectos indirectos que producen en la materia. Si a un cuerpo cargado de electricidad de un signo determinado le acercamos otro cuerpo cargado de electricidad del signo opuesto, entre ellos se establece inmediatamente una fuerza de atracción, poniéndose en movimiento el uno hacia el otro si no hay otras fuerzas que lo impidan. Se dice, entonces, que cada cuerpo ha formado a su alrededor un campo eléctrico, definiéndose éste como la fuerza a la que se ve sometida la unidad de carga eléctrica en un punto. El hecho de que estos fenómenos sucedan de manera semejante, aunque los cuerpos se encuentren situados en el vacío, prueba que, para la existencia de un campo eléctrico (magnético o gravitatorio), no es necesaria la existencia de sustrato material alguno. La razón por la que, sin saber lo que son las cargas eléctricas, y por tanto la electricidad, se haya podido avanzar tanto en su conocimiento, aprovechando sus propiedades en nuestro beneficio, es porque quienes se han dedicado al estudio de los sistemas eléctricos lo han hecho describiendo las leyes que rigen cómo se producen estos fenómenos naturales mediante modelos matemáticos, que nos explican de manera coherente el comportamiento global del sistema.

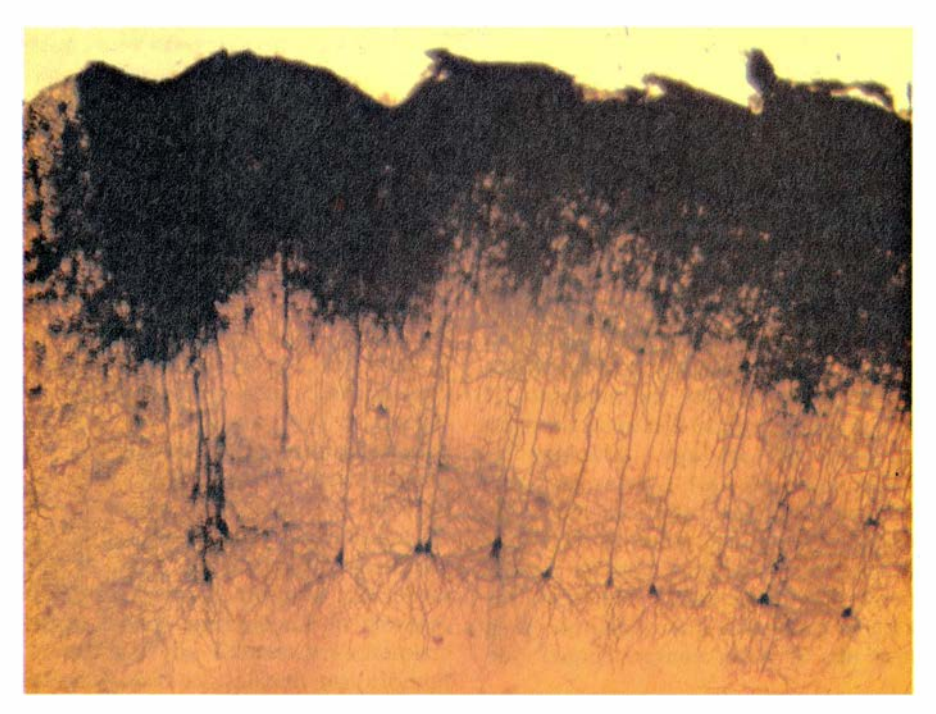
Podemos afirmar con poco margen de error que el sistema biológico más simple es más complicado que un sistema físico complejo. El hombre puede dominar perfectamente el comportamiento de un satélite artificial, pero no puede hacerlo todavía con el de una simple célula nerviosa, o neurona, cuando se encuentra "in situ". Esto es debido, en parte, a que mientras la mayoría de los sistemas físicos (especialmente los creados por la mano del hombre) son lineales, los biológicos son no-lineales. Las propiedades de los lineales pueden establecerse de manera unívoca mediante ecuaciones matemáticas, propiedad que no comparten los sistemas no-lineales.

1. ESPINAS DENDRITICAS de la capa IV del área visual de la corteza cerebral de una rata de 30 días de edad crecida en oscuridad, situadas a lo largo del tallo apical de una neurona de la capa V. La simple observación de esta microfotografía hace pensar que las espinas dendríticas se distribuyen al azar a lo largo de los tallos apicales de las neuronas piramidales. Pero ello no es cierto. (Método de tinción de Golgi rápido. Microfotografía tomada a 500 aumentos en el original. Preparación realizada por el autor.)



2. NEURONAS PIRAMIDALES de la capa III del área visual de una rata de 30 días de edad, teñidas según el método de Golgi rápido. En la microfotografía, tomada con un aumento total de 80 diámetros en el original, puede apreciarse el soma neuronal, los tallos apicales, perpendiculares a la superficie del cerebro, el complejo dendrítico basal y el axón; se dirigen hacia abajo para contactar con otra neurona cuyo cuerpo se distingue en la parte inferior de la microfotografía. (Preparación realizada por el autor.)

La respuesta de un sistema lineal a un estímulo será siempre la misma (dentro de ciertos márgenes), dependiendo tan sólo de cuál sea su función de transferencia. Sin embargo, la de un sistema no-lineal puede depender de cómo haya sido el estímulo anterior, o lo que es lo mismo, están dotados de memoria, como es el caso de la membrana excitable del sistema nervioso, cuya respuesta a un estímulo eléctrico no sólo depende del estímulo que la produce, sino también del intervalo de tiempo transcurrido desde que recibió el estímulo anterior y las características de éste.



3. CONJUNTO DE NEURONAS PIRAMIDALES de la capa III del área visual de la corteza cerebral de una rata de 20 días de edad. En la micrografía puede apreciarse claramente cómo el paralelismo existente entre los tallos apicales de las neuronas piramidales se extiende a toda el área cortical (Método de tinción de Golgi rápido. Microfotografía tomada con una ampliación original de 50 aumentos. Preparación realizada por el equipo técnico del Departamento de Biofísica del Instituto Cajal de Madrid.)

Entre sus desventajas, los sistemas no-lineales cuentan la de poder ser inestables. Ahora bien, los sistemas biológicos, aun siendo no-lineales, presentan en situaciones normales (no patológicas), una estabilidad permanente, que consiguen, muy posiblemente, conectándose unos a otros y colaborando cada uno a la estabilidad de aquellos con los que se encuentra relacionado. En virtud de ello, la respuesta de un sistema biológico (un centro nervioso, por ejemplo) tendrá que ver no sólo con el estado intrínseco del sistema considerado y las características del estímulo, sino también con el estado de todos los demás centros relacionados con él. Aquí reside la razón de que las medidas obtenidas de los sistemas biológicos estén afectadas por una gran variabilidad o "ruido", que puede considerarse intrínseco del sistema y que enmascara la información o "señal" buscada.

Con objeto de evitar este inconveniente y poder obtener medidas repetibles de los sistemas biológicos, paso, a su vez, imprescindible para averiguar las relaciones estables entre ellas que nos permitan encontrar, si existe, un modelo matemático que nos ayude a definirlo y profundizar en su estructura, es necesario trabajar con un número muy grande de medidas, algo que no ha podido hacerse hasta la llegada de los ordenadores electrónicos.

La construcción de un modelo matemático de un sistema biológico consta de las siguientes fases: estudio general del sistema a describir, elección de la variable o variables más representativas del sistema, estudio de las relaciones entre estas variables, establecimiento de las hipótesis de trabajo que expliquen esas relaciones, formulación del modelo y prueba de validez del mismo y estudio de su alcance (generalidad y limitaciones).

Desarrollaremos estos puntos a través de un ejemplo concreto: la realización de un modelo matemático que explica de manera coherente la distribución de espinas dendríticas a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales de la corteza cerebral de la rata y su evolución con la edad del animal. Describiremos luego cómo ciertas situaciones carenciales o patológicas afectan al desarrollo de la corteza cerebral; con la advertencia de que, cuanto sigue, aunque pueda parecer de carácter restrictivo y aplicable sólo al caso particular que se expone, puede ser extendido al estudio del efecto que otras situaciones patológicas producen en el desarrollo cortical e incluso a la realiza-

ción de modelos matemáticos de otras estructuras biológicas, sin más que hacer las correspondientes generalizaciones. De hecho, el autor, siguiendo las fases antes descritas, llegó a describir un modelo matemático que explicaba de manera coherente las propiedades de contractibilidad del miocardio, y, haciendo uso del aquí descrito, llegó a determinar, junto con varios equipos de trabajo en el Instituto Cajal de Madrid, cómo diversas situaciones carenciales o patológicas (la oscuridad, la enucleación, el exceso de hormonas, la inmovilidad, la edad y el hipotiroidismo), afectaban el desarrollo de la corteza cerebral.

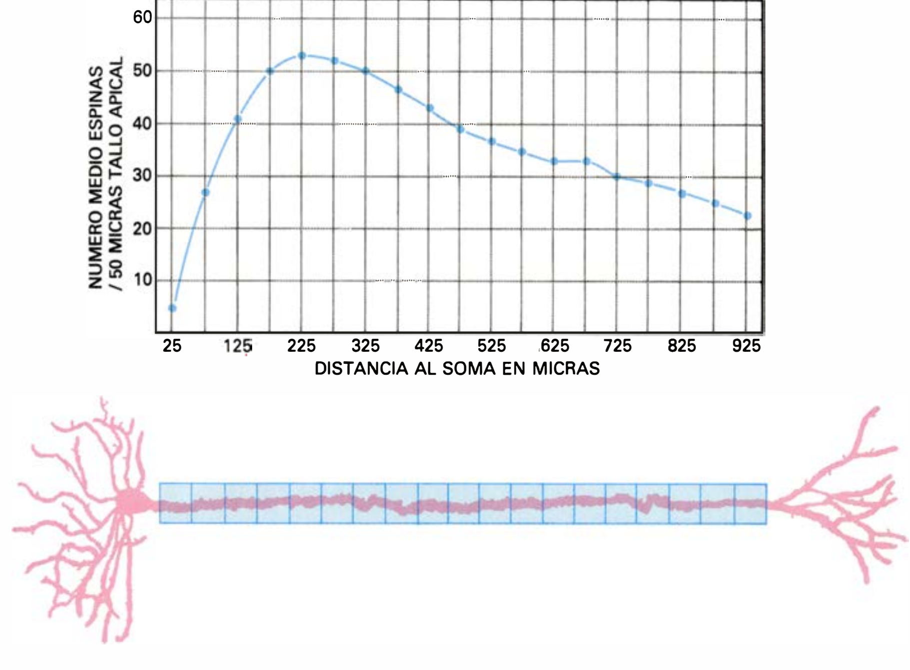
La corteza cerebral se sitúa en la parte más externa del cerebro; en el hombre tiene un espesor de dos milímetros y de 1,5 en la rata. Consta de más de dos mil millones de neuronas ($2,6 \times 10^9$), unidas entre sí, a través de las sinapsis, con cientos o miles de sus vecinas y con otras neuronas situadas en las zonas profundas del cerebro o en la médula espinal. Recientemente se ha estimado que una sola neurona puede tener más de 30.000 contactos sinápticos. Estos números nos dan una idea de la extraordinaria complejidad de la estructura cortical. Si a esto añadimos el hecho de que en la corteza cerebral existen muchos tipos de neuronas, llegamos a la conclusión de que resulta ingenuo pretender encontrar las leyes que rigen este sistema en su conjunto.

Pero en la corteza cerebral existen subsistemas mucho más simples que admiten un tratamiento cuantitativo. Las así llamadas neuronas piramidales constan, como todas, de un cuerpo celular, o soma, y de unas ramificaciones, o dendritas, por donde principalmente reciben la información de la neurona anterior, y un axón, o cilindroeje, por donde envían la información a la neurona siguiente. Estas neuronas deben su nombre a la forma de su cuerpo celular; poseen una dendrita principal, el tallo apical, que es perpendicular a la superficie del cerebro, lo que les confiere la importante propiedad topológica de ser paralelas entre sí a lo largo de toda la corteza cerebral. Parte de estas neuronas tienen su cuerpo situado en la capa V de la corteza, cerca de la sustancia blanca. En virtud de ello, su tallo apical recorrerá toda la corteza cerebral; por consiguiente, las medidas que obtengamos de algunas variables que guarden relación directa con las sinapsis a lo largo de estos tallos apicales nos reflejarán el efecto global que sobre la corteza cerebral ejerza una situación patológica que sufra el animal. Motivo por el que consideramos interesante realizar nuestro estudio en este tipo de neuronas.



4. NEURONA DE LA CAPA V, o neurona profunda del área visual de la corteza cerebral de una rata de 30 días de edad. El tallo apical de estas neuronas recorre toda la corteza cerebral. (Método de tinción de Golgi. Microfotografía tomada con 40 aumentos en el original. Preparación realizada por el autor.)

Acotado ya el sistema que vamos a estudiar, los tallos apicales de las neuronas piramidales profundas, veamos qué variables se han de seleccionar para elaborar el modelo. De los tallos apicales (como de otros tipos de dendritas) sobresalen unas protuberancias o espinas, descubiertas por Santiago Ramón y Cajal en 1894. Gray, en 1959, con técnicas de microscopía electrónica, confirmó la tesis cajaliana de la importancia funcional de las espinas: allí se produce el contacto entre una neuro-



5. METODO DE MEDIDA utilizado para determinar la distribución de espinas dendríticas a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales. Una vez medido el número de espinas en porciones de 50 μ de longitud, los valores medios obtenidos para cada segmento se colocan en la gráfica frente a la distancia al soma. La distribución obtenida muestra que las espinas dendríticas no se distribuyen al azar a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales, como podría pensarse de la simple observación de la figura 1.

na y la siguiente. Más tarde se demostraría que en ellas conectan el 80 o 90 por ciento de las fibras o axones específicos que portan la información del tálamo a la corteza cerebral. Dado que este contacto es de uno a uno, el estudio del número y distribución de espinas a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales profundas nos proporcionará una información directa sobre la distribución de sinapsis a lo largo de estos tallos. Las variables escogidas han sido, pues: número de espinas dendríticas existentes en porciones de 50 micrometros de tallo apical, E; distancia de cada uno de estos segmentos al soma neuronal, X; y edad del animal, T.

La mera observación de estas espinas, sin tomar medidas, nos lleva a la conclusión errónea de que se distribuyen a lo largo del tallo sin orden alguno, al azar. Pero si medimos el número de estos elementos en porciones de 50 micrometros de longitud, y colocamos los valores medios de los números así obtenidos en cada segmento en función de la distancia que los separa del soma celular, obtenemos una distribución como la mostrada en la figura 5, correspondiente a los valores medios de estas medidas en tallos apicales del área visual de la corteza cerebral de una rata Wistar de 40 días de edad. El estudio de este tipo de distribución así obtenido, en animales de la misma especie de edades diferentes, nos indujo a concluir que las espinas dendríticas no se distribuían al azar a lo largo de los tallos apicales y que la forma de distribuirse debía ser estable y común a todas las edades; cabía pensar, pues, en la posibilidad de describir de manera coherente todas estas distribuciones mediante un modelo matemático.

La forma de estas distribuciones nos hizo pensar en la existencia de dos tipos de factores, intrínsecos a la neurona: uno, causante del crecimiento del número de espinas en el tramo de dendrita más próximo al cuerpo celular, al que llamamos potenciador, B; y otro, causante del descenso de este número en la zona más alejada y que denominamos inhibidor, IF. Los dos factores cumplirían, pues, funciones antagónicas, permitiendo a la neurona obtener un equilibrio estable en el número y distribución de espinas.

El estudio de la forma de crecimiento en la parte más próxima del cuerpo celular nos indicó que la pendiente de crecimiento era proporcional, en cada punto, al valor del número de espinas obtenidas en ese punto. La función matemática que cumple esa propiedad es la exponencial. Por tanto, se postuló que dichos factores actuarían de forma exponencial. Habida cuenta de que las distribuciones no pasaban por el origen de coordenadas –donde arranca el número medio de espinas y la distancia del soma–, sino que las espinas empiezan a aparecer a cierta distancia del soma, se precisaba introducir un nuevo factor, que llamamos K, para poder explicar este fenómeno.

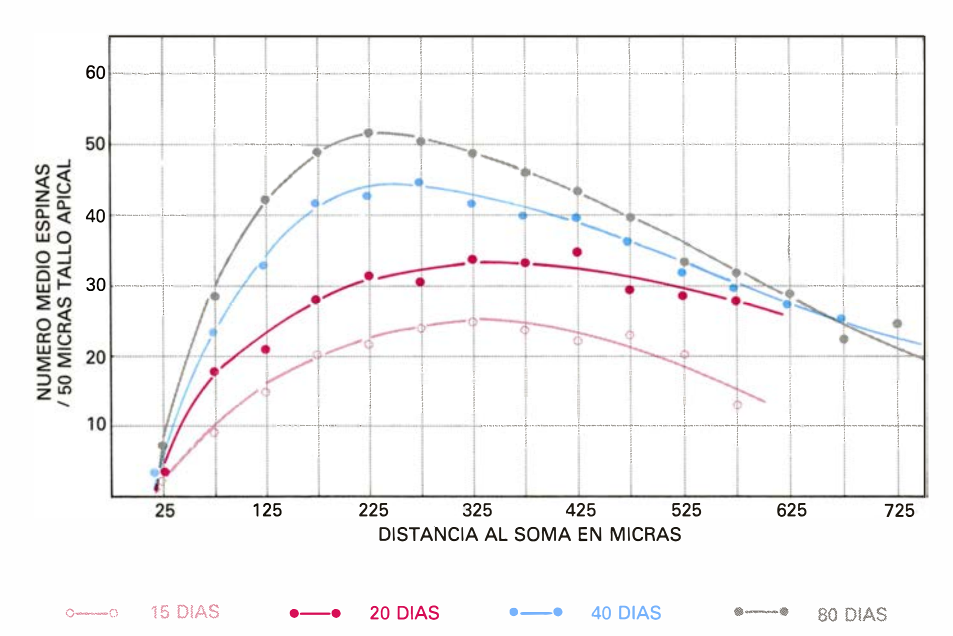
Así se postuló, como posible definición de las distribuciones encontradas en los distintos ensayos, la ecuación siguiente: $E(X) = E_m \quad (1 - K \times e^{-BX}) \times e^{-IFX}$, donde X representa la distancia al cuerpo celular desde un punto cualquiera de la dendrita; $E(X)$, el número de espinas existentes a esa distancia; E_m, el valor máximo de espinas que puede tener un segmento de dendrita de 50 micrometros de longitud y, e, la base de logaritmos neperianos.

Una vez postulada esta ecuación, hay que probar su validez a la hora de describir las distribuciones de espinas reales encontradas experimentalmente. En este sentido, conviene tener presente que, para que un modelo matemático sea válido, no hay que elegir un ajuste teórico-experimental perfecto. De hecho, si el ajuste entre la distribución encontrada experimentalmente y la predicha por el modelo fuera perfecta, habría que dudar de la validez de éste ya que la propia variabilidad intrínseca de los datos experimentales determina que este ajuste perfecto sea imposible.

Para someter a comprobación la validez del modelo descrito por esa ecuación ideamos un programa de ordenador (al que bautizamos con el nombre de ESPINAS), escrito en código *Fortran*. Las entradas del mismo eran los datos recogidos en las medidas y el procesamiento seguía un algoritmo, ideado por el autor, que permitía al ordenador encontrar los valores de E_m, K, B e IF, correspondientes al mejor ajuste entre los datos experimentales y el modelo descrito por la ecuación anterior, suministrando además el valor de χ^2 (ji cuadrado), parámetro estadístico que nos indica si este ajuste óptimo podría ser aceptado como bueno, o no. La figura 7 muestra una hoja de resultados obtenida con este programa.

Con la ayuda de este programa el ordenador ratificó que el modelo matemático descrito por la ecuación era válido para representar las distribuciones de espinas a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales de ratas Wistar de edades comprendidas entre los 10 y 120 días, edad a partir de la cual, debido al envejecimiento natural de las neuronas del animal, el modelo perdía su validez; esto, a su vez, aportaba un dato de interés: servía para discriminar entre distintos estados del cerebro correspondientes a diferentes edades.

Se demostró, asimismo, que el modelo describía bien la distribución de espinas del ratón, hámster, gato, mono y hombre, en todas las áreas corticales estudiadas, y que fueron la visual, auditiva, motora y somestésica. No sólo a lo



6. DISTRIBUCION DE ESPINAS a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales de la corteza cerebral de ratasde 15 a 80 días de edad en función de la distancia al soma. En esta gráfica puede apreciarse cómo el tipo de distribución se mantiene con la edad; evoluciona con el desarrollo de éste.

largo de los tallos apicales, sino también de todo tipo de dendritas. Pero con ser esta propiedad de generalidad muy importante, más interesante resultó la concordancia hallada entre los valores obtenidos por el ordenador para los coeficientes correspondientes a cada edad y al tipo de evolución natural del animal. Colocados los valores de los coeficientes *K, B* e *IF*, encontrados por el ordenador para cada edad *T*, en una gráfica, se apreciaba una fuerte subida inicial, que coincidía con la época neonatal, seguido de un período de estabilización correspondiente a la madurez del individuo examinado.

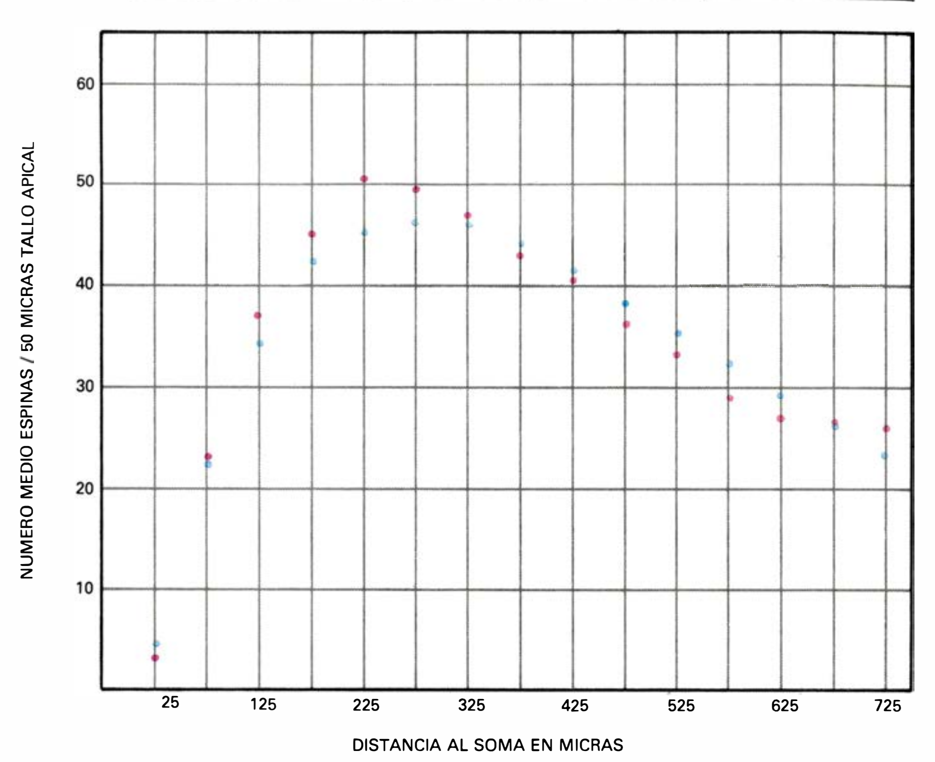
Dicha evolución pudo ser descrita por las tres ecuaciones paramétricas siguientes: *1)* $K(T) = Km(1-K_k\ T^{-K_b})$; *2)* $B(T) = Bm(1-B_k\ T^{-B_b})$; y, por último, *3)* $IF(T) = IFm(1-IF_k\ T^{-IF_b})$, donde $K(T)$, $B(T)$ e $IF(T)$ representan los valores que toman los coeficientes *K, B* e *IF* a la edad *T* del animal; *Km, Bm* e *IFm* indican los valores máximos que estos coeficientes alcanzan a lo largo de la vida del animal. El resto de los coeficientes, K_k, K_b, B_k, B_b, IF_k e IF_b, son coeficientes necesarios para completar estas ecuaciones; nos muestran de qué forma los coeficientes principales *K, B* e *IF* aumentan de valor con el desarrollo del animal.

Estas tres ecuaciones, que nos dan la idea global de la evolución temporal, junto con la ecuación principal mencionada más arriba, y que nos permite conocer el número de espinas existente a una distancia *X* cualquiera al soma neuronal, constituyen el modelo matemático completo. Entre otras cosas, el modelo predice la distribución de espinas correspondiente a un animal de una edad, *T*, determinada.

En efecto, suministrando al ordenador el valor de *T*, éste, resolviendo las ecuaciones que acabamos de exponer, calcula los valores de *K, B* e *IF* correspondientes a esa edad. Conocidos estos valores y resolviendo la ecuación principal, se obtendrá la distribución de espinas correspondiente. De esta forma se dedujeron distribuciones de forma teórica. Las distribuciones predichas por el ordenador, para edades que todavía no habían sido estudiadas, coincidieron con las experimentales estudiadas "a posteriori", lo cual supuso una prueba más de la validez del modelo. Sin embargo, y con ser este aspecto importante, lo más significativo en orden a probar la validez del modelo fue la concordancia encontrada entre la forma de variar los valores de los coeficientes *K, B* e *IF* con la edad del animal (subida inicial rápida hasta los 40 días aproximadamente y estabilización posterior); así como la evolución natural que con la edad sufren algunas variables vitales del animal: peso, longitud, etcétera. Este hecho encierra especial interés, ya que el haber postulado una ecuación o sistema de ecuaciones que ajusten de manera adecuada los datos experimentales no garantiza en absoluto que esta o estas ecuaciones representen algo relevante para el sistema; hay muchas ecuaciones con una capacidad de ajuste a distintos tipos de distribución, tan potentes, que ajustarían muchos tipos simultáneamente, sin decir nada sobre la estructura del sistema particular que se desea describir. Por esta razón, si los valores obtenidos para los coeficientes *K, B* e *IF* para distintas edades del animal hubieran variado al azar, se podía pensar que la ecuación principal ajustaba las distribuciones de forma arbitraria, teniendo más mérito el trabajo realizado por el propio ordenador que el poder descriptivo de la ecuación.

K = 1,01200	B = −0,00073	IF = 0,00345	χ^2 = 2,180

3,79	23,53	37,21	45,18	50,47	49,88	47,00	43,79	40,47	36,77	33,04	29,30	27,83	26,33	26,00
4	22	34	42	45	46	46	44	41	38	35	32	29	26	23
0,79	1,74	1,70	1,52	1,58	1,83	1,70	1,67	1,70	1,69	1,64	2,57	3,95	7,98	0,00



7. HOJA DE RESULTADOS del programa ESPINAS, el cual, haciendo uso, como dato, del contaje de espinas medido experimentalmente en tallos apicales individuales, calcula la distribución experimental media (*puntos azules*) y la teórica que mejor ajusta con ésta (*puntos rojos*), suministrando los valores de *K, B* e *IF* con los que ha conseguido este ajuste, así como el grado del mismo medido con el valor de χ^2.

Al modelo matemático hay que exigirle también que resuelva, en caso de duda, la estructura final del sistema. En nuestro dominio, predice que, sea cual sea el tallo apical que se estudie, e independientemente de la profundidad a la que esté situado su soma dentro de la corteza cerebral, en la zona distal debe tener menos espinas que en la zona media.

Tradicionalmente se creía que, si una dendrita era rodeada por un complejo axonal, dicho axón haría contacto con la dendrita cuando la distancia entre ambos fuera inferior a algunos micrometros. Sin embargo, pudo comprobarse en algunas preparaciones histológicas cómo una arborización axónica de una neurona de cilindroeje corto (situada en la capa II de la corteza), que rodeaba por igual varios tallos apicales (de neuronas cuyos somas estaban situados en las capas III y V), no producía los mismos contactos sinápticos en

ambos, siendo mucho menores los encontrados en la zona distal de los tallos apicales de neuronas de la capa V que en la zona media de otros tallos de neuronas de la capa III. Y esto era justamente lo que, para la distribución de espinas, predecía el modelo.

Este último hecho nos lleva a tomar el modelo matemático descrito como válido para explicar la distribución de espinas a lo largo de las dendritas de las neuronas piramidales de la corteza cerebral y su evolución con la edad del animal.

La validez del modelo se refuerza con su universalidad. El aquí descrito sirve para describir las distribuciones de espinas, no sólo a lo largo de los tallos apicales, sino también a lo largo de dendritas basales. Y ello en todas las áreas corticales de distintas especies de mamíferos: ratón, rata, hámster, mono y hombre. Pero los modelos tienen también sus limitaciones. El nuestro no sirve, por ejemplo, para describir las distribuciones de espinas en animales de edad avanzada, ni aquejados de una grave enfermedad, como es el hipotiroidismo neonatal. Ahora bien, una vez conocido, esto resulta ser una ventaja más que un inconveniente, pues sirve (al descifrar el grado de desajuste) para distinguir entre diferentes estados del cerebro y estudiar cómo situaciones carenciales o patológicas afectan su desarrollo.

Los modelos matemáticos ayudan a solucionar problemas de tipo biomédico. Para saber cómo una situación patológica afecta una estructura biológica, o su desarrollo, es preciso conocer antes las pautas por las que se rige esta estructura (o su desarrollo) en su estado normal. El modelo matemático define esas pautas y nos sirve como patrón de comparación.

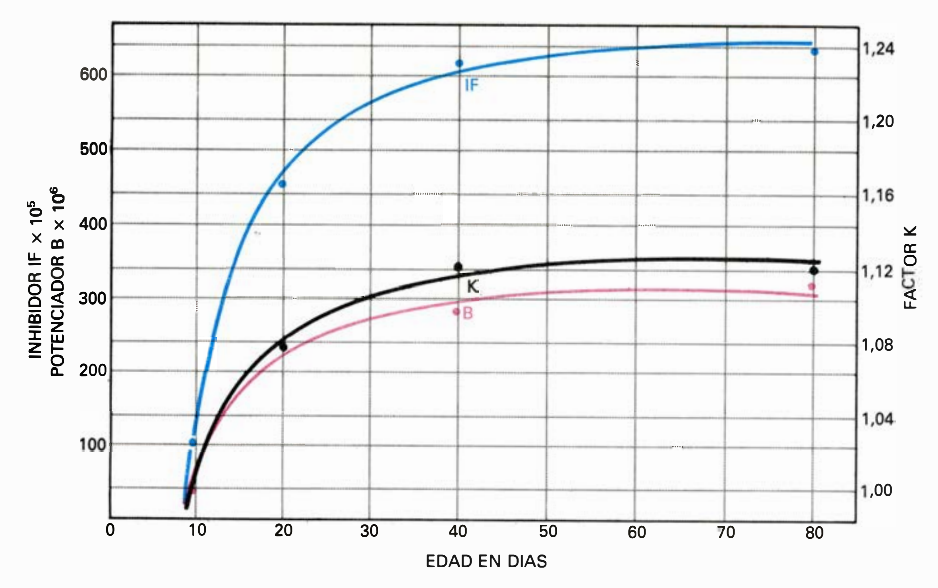
El estudio de las diferencias existentes entre las medidas tomadas en la estructura patológica y las definidas por el modelo nos indicarán dónde y cómo la situación patológica particular afecta a la estructura en cuestión. Así, por ejemplo, las situaciones de estrés persistentes o las que producen una carencia de estímulos (debida a una inmovilidad prolongada en época neonatal) afectan al desarrollo del sistema nervioso en general y de la corteza en particular. Ahora bien, la mera observación al microscopio óptico de dos preparaciones histológicas, perteneciente una a una muestra de corteza cerebral de rata adulta crecida en condiciones de normalidad y otra perteneciente a una rata crecida en condiciones de inmovilidad, no nos permite afirmar nada sobre el efecto que la inmovilidad prolongada tiene sobre la corteza cerebral: ambas son similares. Sin embargo, la observación de las distribuciones de espinas a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales pertenecientes a animales de distintas edades crecidos en condiciones normales y en condiciones de inmovilidad nos revelan cómo la inmovilidad afecta el desarrollo cortical, deteniendo el desarrollo de conexiones sinápticas en esta zona. Afección que es reversible, por fortuna para el animal.

Cuando estudiamos las distribuciones de espinas de animales normales de edades comprendidas entre los 20 y los 120 días, por ejemplo, y las ajustamos con el modelo matemático, obtenemos un valor de los coeficientes *K, B* e *IF* para cada edad. Dichos valores crecen con la edad del animal de una forma similar a la descrita en la figura 8.

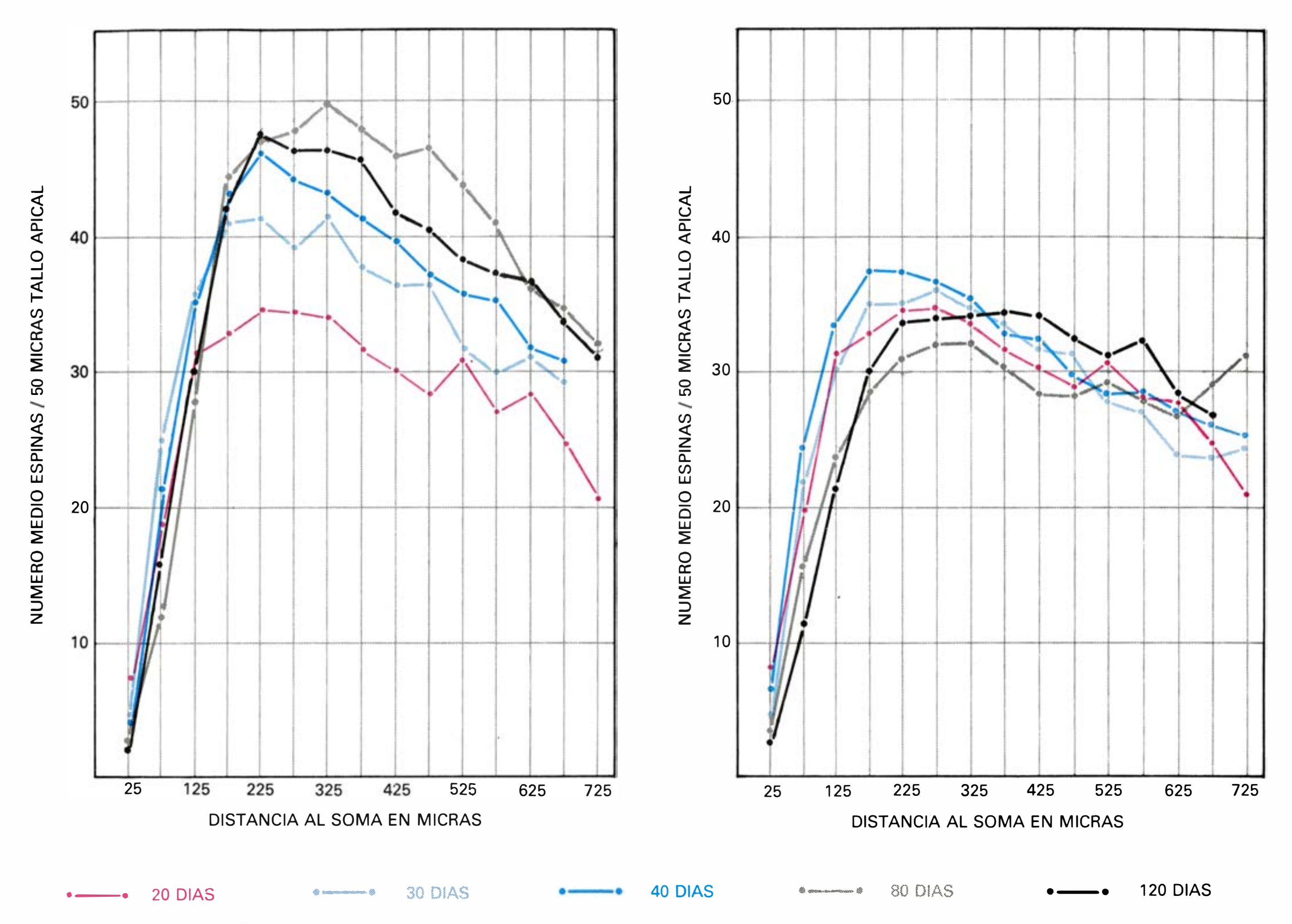
¿Qué distribución de espinas tienen los animales que han permanecido inmóviles, aunque pueden ajustarse por el modelo matemático? Una totalmente distinta, lo que evidencia una distorsión, que indica que la inmovilidad ha producido una parada en la producción de espinas, y, por tanto, de contactos sinápticos, a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales; los valores de los coeficientes *K, B* e *IF* obtenidos por el ordenador para estas distribuciones son prácticamente iguales, lo que prueba que el modelo es capaz de detectar estas situaciones.

El paralelismo observado entre las gráficas resultantes, que puede estudiarse midiendo las diferencias existentes entre ellas, manifiesta que la producción o desaparición de espinas dendríticas no se efectúa a lo largo de los tallos apicales al azar, sino de acuerdo con cierto patrón definido por el modelo. Crezcan o desaparezcan las espinas dendríticas, lo hacen de tal forma que siempre en la parte del tallo apical situada a una cierta distancia del soma neuronal el número de espinas es máximo. Acometí el estudio de estas diferencias con un nuevo programa, al que llamé COMCER, que calcula las diferencias entre el número de espinas correspondientes a segmentos homólogos (a la misma distancia del soma) de dos distribuciones determinadas y nos da un gráfico indicativo de cómo esas diferencias varían a lo largo del tallo apical.

De las gráficas se desprendía que las diferencias entre dos distribuciones pertenecientes a animales que han crecido en condiciones normales y en inmovilidad son máximas en la zona central del tallo apical, correspondiente a la capa IV de la corteza cerebral o zona receptora de los axones específicos procedentes del tálamo. A conclusiones similares se llegó tras el estudio del efecto de la oscuridad en el desarrollo de la corteza cerebral. Pero al aplicar este método al efecto que, en el desarrollo de la corteza, tiene la enucleación, o pérdida de un ojo, extirpado al día siguiente del nacimiento del animal y al efecto producido por el hipotiroidismo, se observó que estas dos situaciones patológicas severas no sólo producían un



8. EVOLUCION CON LA EDAD DEL ANIMAL de los valores de los coeficientes *K, B* e *IF* que configuran la estructura del modelo matemático que describe la distribución de espinas a lo largo de los tallos apicales de neuronas piramidales de la corteza cerebral. Nótese la estabilidad alcanzada a los 40 días.



9. DISTRIBUCIONES DE ESPINAS a lo largo de tallos apicales de neuronas piramidales del área motora de ratas, entre los 20 y 120 días, crecidas en condiciones normales (*izquierda*) y con restricción de movimientos (*derecha*). La simple observación de estas distribuciones muestran cómo la restricción de movimientos afecta el desarrollo del área motora de la corteza cerebral, lo que no se aprecia por la simple observación de las preparaciones histológicas al microscopio. (De la tesis doctoral de J. Sala, presentada, en 1982, en la Universidad Complutense de Madrid. Con cuyo permiso publicamos aquí.)

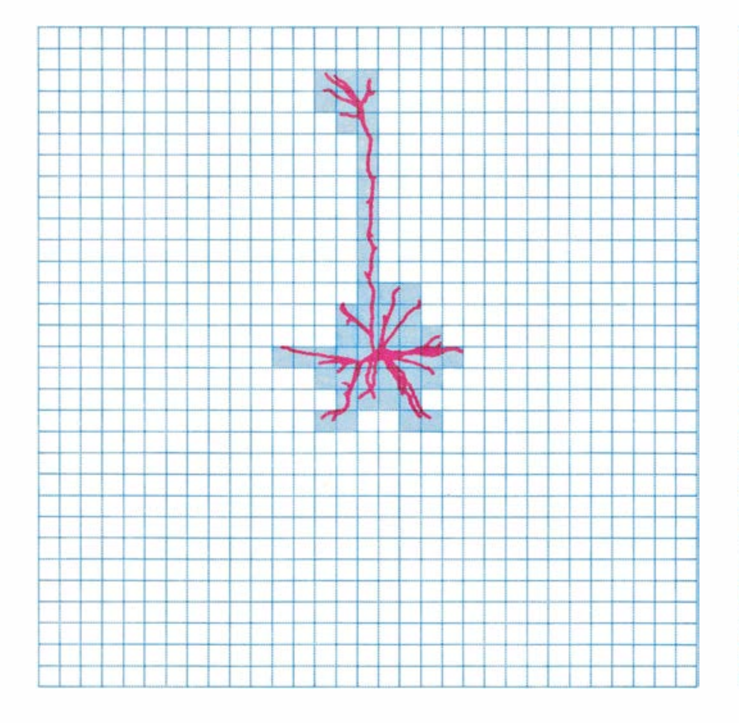
estancamiento en el crecimiento del número de espinas, creándose un déficit de hasta un 30 por ciento, sino también una distorsión en las distribuciones.

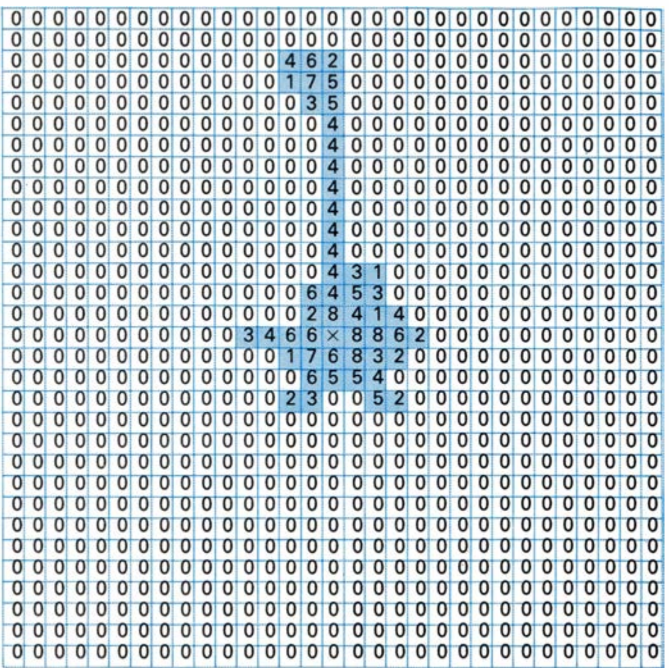
Esto último pudo evaluarse estudiando los valores del parámetro estadístico χ^2 (ji cuadrado), que mide la falta de concordancia entre la distribución en casos normales, descrita por el modelo, y la obtenida para individuos aquejados de tales situaciones patológicas. El crecimiento en el valor del parámetro mostró que las distribuciones correspondientes a animales enfermos se alejaban más de la normal, a medida que el animal crecía. En el caso particular de animales aquejados de hipotiroidismo neonatal, los valores de χ^2, obtenidos al comparar las distribuciones experimentales obtenidas en animales enfermos con la obtenida en animales normales, descrita por el modelo, eran tan grandes, a partir de los 30 días de edad, que el modelo ya no podía ser representativo de ellas; lo que es lo mismo, la distribución obtenida en animales enfermos era distinta de la correspondiente a animales sanos. Dicha diferencia se debía a que en este tipo de animales, en vez de apreciarse una distribución similar a la de la figura 7, se obtenía una gráfica cuyos valores variaban aleatoriamente con la distancia al soma, variaciones que alcanzaban su punto máximo en la zona más alejada del mismo.

Apoyados en estos resultados concluimos que mientras situaciones carenciales de estímulos (oscuridad e inmovilidad) influyen en el número total de espinas, pero no en la forma de distribuirse, situaciones patológicas severas (enucleación e hipotiroidismo) afectan, no sólo al número total de espinas, sino también a la forma de distribuirse.

Como ya dijimos, un algoritmo matemático no es más que un conjunto de operaciones ordenadas que nos sirven para solucionar un problema concreto. Para comparar poblaciones neuronales de una región del cerebro perteneciente a un animal sano con la homóloga de uno enfermo, hemos ideado el algoritmo siguiente. Cada neurona se proyecta sobre un papel cuadriculado (operación que puede realizarse con la ayuda de una cámara clara adosada al microscopio). Una vez proyectada la neurona, se mide la longitud total de dendrita, que llamaremos Lij, que atraviesa cada cuadro individual (i, j), situada en la fila i, columna j, de la cuadrícula; asignando los valores $i = 0$ y $j = 0$ al cuadrado ocupado por el soma neuronal. Hemos convertido así cada neurona N_1 en un conjunto de números ordenados en filas y columnas, o matriz numérica, M_1 [*véase la figura 12*]. Ello significa que hemos convertido la neurona en un conjunto de números, transformación analógico-digital que nos permitirá hacer uso de un ordenador para trabajar con poblaciones neuronales.

Es evidente que, para una misma neurona, los números Lij así obtenidos serán más o menos grandes según que





0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	4	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	4	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	6	6	×	8	8	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	6	8	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

10. METODO DE CUANTIFICACION NEURONAL, de acuerdo con el cual una neurona, proyectada sobre una cuadrícula *(izquierda)*, es convertida por el ordenador electrónico, resolviendo el algoritmo que se explica en el texto, en la matriz numérica que aparece a la derecha. La *X* que aparece en el centro de la matriz representa la posición del soma neuronal y los números, en una escala normalizada de 1 a 9, la densidad dendrítica en cada cuadrícula.

el tamaño de la cuadrícula elegida sea mayor o menor. Con objeto de normalizar esta serie de números, y obtener otros, representativos de ellos, pero independientes del tamaño de cuadrícula elegido, cada número Lij se divide por el área l^2 de cada cuadro, siendo l el lado de un cuadrado elemental de la cuadrícula. Estos nuevos números Lij/l^2, así obtenidos, representan la densidad dendrítica media, o cantidad de longitud dendrítica por unidad de área, existente a una distancia $i \times l$, $j \times l$ del soma neuronal. Intuitivamente, simbolizan la mayor o menor actividad que una neurona puede tener a una distancia dada del soma.

Esta transformación de la neurona en una matriz, N en M, puede aplicarse a cada célula nerviosa de un conjunto homogéneo de n neuronas distintas. (Se denomina conjunto homogéneo al formado por las encuadradas en un mismo tipo y situadas en una misma área del cerebro); para cada una de ellas, N_i, se crea su correspondiente matriz numérica M_i. Una vez obtenidas las n matrices correspondientes a las n neuronas del conjunto considerado, podremos operar con ellas; siguiendo las reglas del álgebra matricial, se calcula la matriz media correspondiente a este conjunto de n matrices, sin más que sumarlas y dividir cada elemento S_{ij} de la matriz suma entre el número de sumandos n que han intervenido en la suma. Esta matriz media A representa la "neurona media" del conjunto de neuronas que han intervenido en su elaboración; puede servir para comparar conjuntos neuronales entre sí y descubrir las diferencias que existan entre ellos, al menos en lo que a sus arborizaciones dendríticas se refiere.

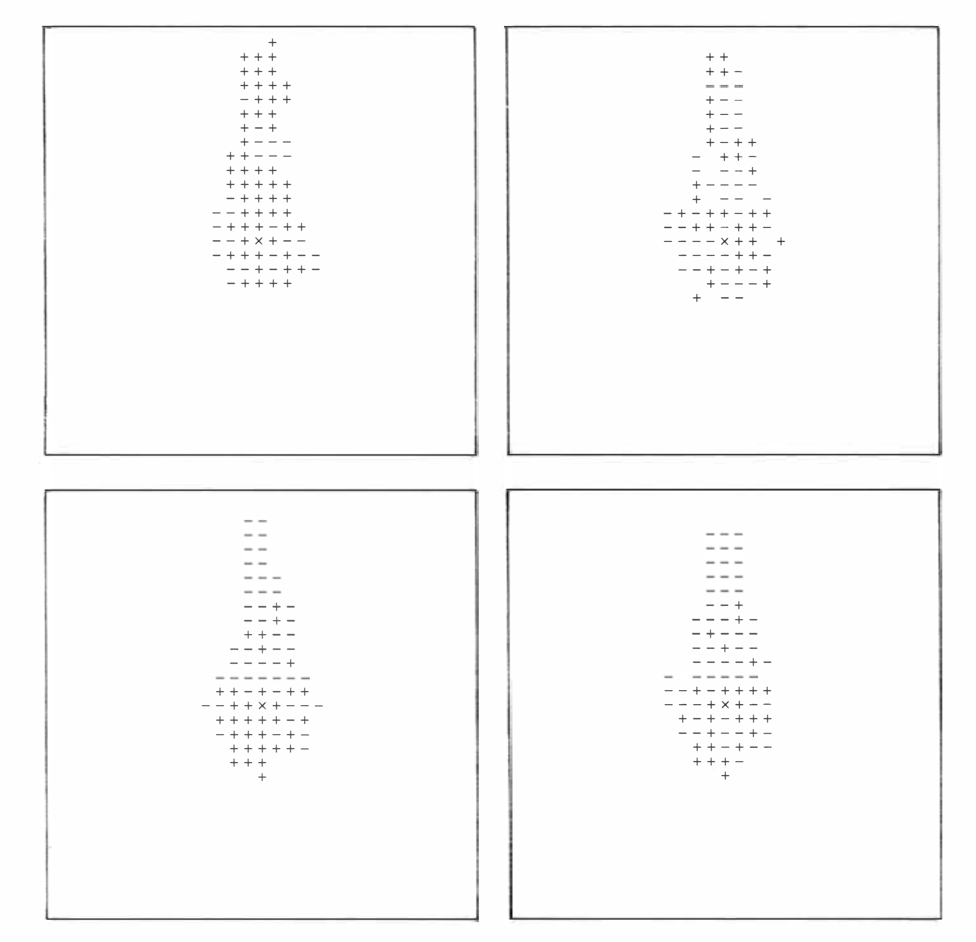
Para conocer, utilizando este algoritmo, cómo una situación carencial o patológica determinada (o la edad) afecta la arborización dendrítica de un conjunto de neuronas, se calculan las matrices medias correspondientes a estos conjuntos. (Simultáneamente se resuelven las matrices de varianzas que acompañan a cada valor medio.) Se compara luego los valores medios obtenidos para cada elemento o cuadrado elemental (i, j) de una matriz con su homólogo (también en la posición i, j) de la otra matriz, anotándose en dicha posición un signo más $(+)$ o un signo menos $(-)$, para las diferencias que sean positivas o negativas y estadísticamente significativas; no se anota nada si la diferencia es cero o carece de significación estadística.

Los valores numéricos que se obtienen para estas diferencias son muy variables; pueden oscilar, por ejemplo, entre $-0{,}30$ y $+0{,}30$. El estudio estadístico completo, que acompaña a este algoritmo, se realiza no sólo sobre estos valores (obteniéndose los correspondientes diagramas de signos $+$ y $-$), sino también sobre los que se consiguen normalizándolos adecuadamente. Pues en este tipo de trabajos importa conocer, además de las variaciones absolutas introducidas por la situación patológica en la estructura dendrítica de la población neuronal, las relativas; de esta suerte, los resultados del estudio estadístico nos dirán si la densidad dendrítica aumenta, o disminuye, hasta qué grado lo hace, en qué medida le afectan determinadas enfermedades o deficiencias, etcétera.

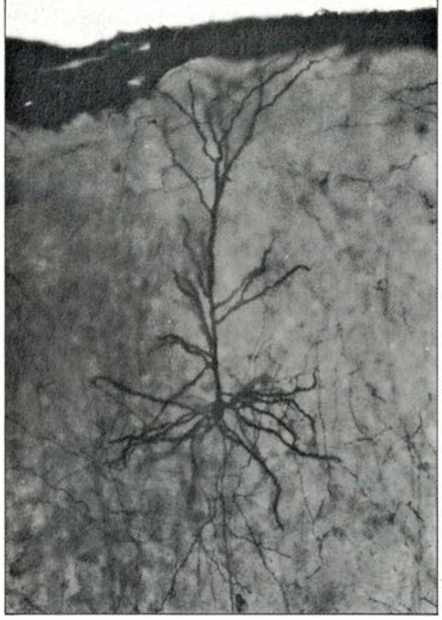
Dado que para representar una neurona con fiabilidad es necesario operar con matrices numéricas de 30×30 elementos, para realizar todas las operaciones antes descritas se hace imprescindible el uso de un ordenador, para lo cual, a su vez, es necesario que éste tenga almacenada en su memoria la estructura de cada una de las neuronas, de una forma codificada tal, que él sea capaz de manejarlas, siempre conforme a una serie de programas. Con un primer programa, llamado ADQUI, realizado, como todos los mencionados en este artículo, por el autor, se introduce en la memoria permanente de disco las tres coordenadas (x, y, z) de cada punto notable de la ramificación dendrítica de la neurona. Estos puntos notables son: el de comienzo de una dendrita, todo punto en que la dendrita cambia de dirección, los puntos donde existe una bifurcación y los puntos donde terminan las ramificaciones dendríticas. Cada punto va seguido de un

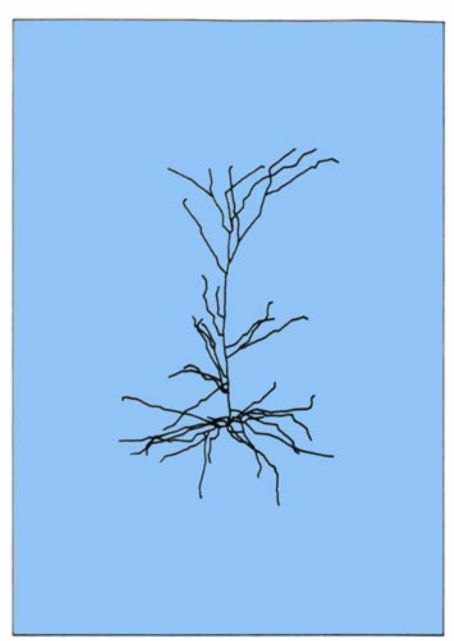
código que le indica al ordenador el tipo de punto que es. Una vez que la neurona ha sido procesada con este programa, queda almacenada en forma de lista de valores de coordenadas (*x, y, z*), seguidas de su código correspondiente. Con otro programa, llamado DYNFOT, el ordenador puede reproducir la neurona en una pantalla conectada con él e, incluso, haciendo uso de la matriz de giro, nos puede representar la neurona girada en cualquier ángulo del espacio. La figura 12 muestra la microfotografía de una neurona tomada en un microscopio y las sucesivas representaciones que de ella ha realizado el ordenador, en su posición normal (sin girar) y girada 90 grados alrededor de los ejes de coordenadas *x, y*, y *z*. Este programa sirve, entre otras cosas, para verificar la fiabilidad con que el ordenador es capaz de interpretar y reproducir una neurona, empleando sólo la lista de valores de coordenadas y códigos.

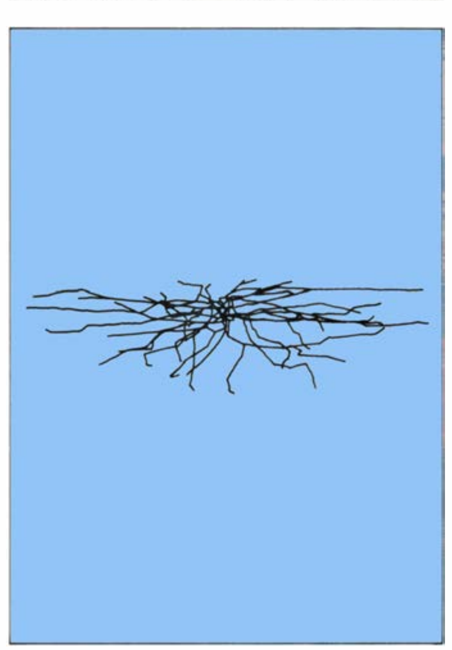
Siguiendo las instrucciones de otro programa, llamado ACRON, el ordenador realiza todas las operaciones encaminadas al cálculo de la neurona media de un conjunto de neuronas previamente codificadas y almacenadas en su memoria permanente de disco. Con las instrucciones del mismo, el ordenador crea una cuadrícula virtual en su memoria y proyecta sobre ella, sucesivamente, la lista de coordenadas de cada neurona que forma parte del grupo del que se desea hallar la matriz media. El ordenador, cada vez que proyecta una neurona particular sobre la cuadrícula, suma en cada uno de los cuadros individuales que la forman un número igual a la longitud de dendrita que atraviesa dicho cuadro, longitud que calcula midiendo la distancia entre cada dos puntos sucesivos de la arborización dendrítica. Cuando ha realizado esta operación con la última neurona del grupo, el ordenador divide los números obtenidos entre el número total de neuronas que forman el grupo, obteniendo así la matriz media de cada grupo neuronal que, junto con la correspondiente matriz de varianzas, almacenará en su memoria permanente de disco. Finalizada la acción de este programa, otro

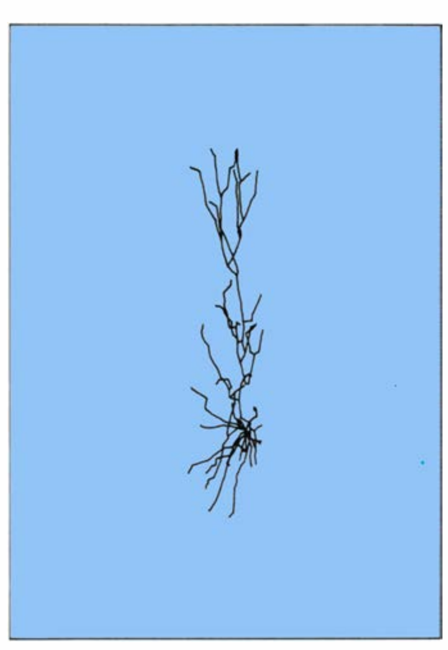


11. EVOLUCION CON LA EDAD de la densidad dendrítica neuronal. Al realizar la comparación de las "neuronas medias" calculadas, pertenecientes a grupos de neuronas de ratas de edades comprendidas entre los 24 y 120 días de edad, el ordenador encuentra que esta densidad crece entre los 24 y los 40 días (predominio de los signos +, *arriba a la izquierda*), se estabiliza entre los 40 y 80 días (*arriba, derecha*) y decrece a partir de esa edad (*abajo, izquierda* 120-80 d.; *derecha* 120-40 d.; predominio de signos −).









12. RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL, realizada por un ordenador electrónico de una neurona piramidal (*cuya microfotografía se muestra en el ángulo superior izquierdo*), perteneciente a la capa III del área visual de una rata de 30 días de edad. Las coordenadas (*x, y, z*) de los puntos más notables de la neurona son almacenadas en la memoria del ordenador, el cual, y de acuerdo con programa (DYNFOT) realizado con este fin, puede reconstruir la neurona en cualquier posición espacial que se desee. En la fotografía compuesta aparecen la neurona reconstruida en su posición normal (*arriba, derecha*), vista "desde abajo" (*abajo, izquierda*), "de perfil" (*abajo, derecha*). Adviértase que la neurona está cortada.

nuevo, al que llamo COMPAR, tomando como datos de entrada las matrices medias y sus correspondientes matrices de varianzas, realiza las comparaciones estadísticas adecuadas, que se expresan en los diagramas de salida.

Hasta hace relativamente poco, no más de 30 años, la metodología empleada en el estudio de los sistemas biológicos era meramente descriptiva. Pero el acúmulo de datos y la complejidad que los mismos han adquirido en los últimos años hace que sea imprescindible realizar, con objeto de seguir avanzando en el conocimiento de estas estructuras, una ordenación de los mismos, tratando de establecer relaciones estables entre ellos para deducir una estructuración coherente que, de una forma global y objetiva, sea susceptible de resumirse en una teoría que sirva no sólo para explicar los hechos experimentales que la apoyan sino también para "predecir" y ver nuevas situaciones que pueden crearse al variar las condiciones experimentales que han servido para construirlas.

Juegos de ordenador

De cómo manejar números de miles de cifras, y de por qué nos es necesario

Fred Gruenberger

Nota de la Redacción: Este mes, el autor de "Juegos de ordenador" es Fred Gruenberger, profesor de ciencias de cómputo de la Universidad estatal de California en Northridge. Gruenberger tomó contacto con la maquinaria de cómputo hace más de 40 años; desde entonces ha publicado 28 libros sobre la materia. De 1973 a 1981 ocupó la jefatura de redacción de la revista mensual *Popular Computing*.

A partir del próximo mes, la sección "Juegos de ordenador" correrá a cargo de A. K. Dewdney, profesor adjunto de informática de la Universidad de Ontario occidental. Aunque el principal campo de actividad profesional de Dewdney sea la teoría de la computabilidad, a muchos lectores les resultará más conocido por sus investigaciones sobre la ciencia y la tecnología del "planiverso" bidimensional, que presentara aquí mismo Martin Gardner (véase "Juegos matemáticos", Investigación y Ciencia", septiembre de 1980). La reseña que Dewdney hace de su trabajo (*The Planiverse: Computer Contact with a Two-dimensional World*) se publicó hace poco en Poseidon Press. Una colección de ensayos sobre las ciencias de cómputo, *The Turing Omnibus*, aparecerá el año que viene en Computer Science Press.

Si el lector dispone de una calculadora provista de tecla de elevación al cuadrado, pruebe a introducir el número 1,0000001 y a pulsar 27 veces la tecla de elevación. Tal proceder equivale, matemáticamente, a elevar el número inicial a la 134.217.728-ésima potencia. El resultado correcto, con precisión de 10 cifras significativas, es 674.530,4707; pero es casi seguro que la calculadora mostrará un resultado algo diferente. El problema está ideado con la pretensión de revelar el grado de precisión de la máquina. La figura 3 presenta los resultados obtenidos con diversas calculadoras y con algunas versiones de lenguajes Fortran y BASIC, instalados en unos cuantos ordenadores. Ninguna de esas máquinas alcanzó tan siquiera a dar correctamente siete cifras significativas.

NUMERO DE ITERACIONES	EXPONENTE	PRECISION: OCHO CIFRAS	PRECISION: 15 CIFRAS
0	1	1.0000001	1.00000010000000
1	2	1.0000002	1.00000020000001
2	4	1.0000004	1.00000040000006
3	8	1.0000008	1.00000080000028
4	16	1.0000016	1.00000160000120
5	32	1.0000032	1.00000320000496
6	64	1.0000064	1.00000640002016
7	128	1.0000128	1.00001280008128
8	256	1.0000256	1.00002560032640
9	512	1.0000512	1.00005120130818
10	1024	1.0001024	1.00010240523794
11	2048	1.0002048	1.00020482096271
12	4096	1.0004096	1.00040968387705
13	8192	1.0008192	1.00081953559497
14	16384	1.0016391	1.00163974282853
15	32768	1.0032809	1.00328217441361
16	65536	1.0065726	1.00657512149610
17	131072	1.0131884	1.01319347521490
18	262144	1.0265507	1.02656101821804
19	524288	1.0538063	1.05382752412486
20	1048576	1.1105077	1.11055245060312
21	2097152	1.2332274	1.23332674554061
22	4194304	1.5208498	1.52109486126578
23	8388608	2.3129841	2.31372957696917
24	16777216	5.3498954	5.35334455534193
25	33554432	28.621381	28.6582979282091
26	67108864	819.18345	821.298040141993
27	134217728	671061.52	674530.470741078

1. Resultados de elevar repetidamente al cuadrado 1,0000001, con precisión limitada

En la mayoría de las calculadoras electrónicas, la operación de elevar al cuadrado no es equivalente a la de introducir un número y multiplicarlo por sí mismo. En este último caso, los factores que intervienen en la multiplicación están limitados en tamaño o en precisión por el número de dígitos que la máquina puede presentar en su pantalla. La elevación de un número al cuadrado, en cambio, opera sobre la representación que de éste se almacena en la máquina, representación que por lo general incluye unas cuantas "cifras de salvaguardia", dígitos adicionales utilizados en los cálculos, que no se le ofrecen al operador. Así pues, al calcular la raíz cuadrada de 2 con una calculadora de ocho cifras en pantalla y dos más de salvaguardia, el resultado presentado será 1,4142136, pero su representación interna, almacenada, será 1,414213562. Al pulsar la tecla de elevación al cuadrado podremos recobrar el valor primitivo 2,0000000, mientras que, al multiplicar por sí mismo 1,4142136, el resultado que da la calculadora sería 2,000000106.

En la mayoría de los cálculos, un error en la séptima cifra decimal es de poca monta. Imaginemos, sin embargo, que el cálculo forme parte de un programa de ordenador que ejecutará cierta secuencia de instrucciones si el valor calculado es exactamente igual a 2, y una secuencia diferente en caso contrario. Los efectos de tal imprecisión podrían ser catastróficos. La forma más segura de evitar semejantes riesgos seguramente consista en redondear el valor calculado a un determinado nivel de exactitud antes de compararlo con 2 para ver si son iguales. En otras circunstancias, la estratagema de redondeo no sirve de nada. En el problema de elevar reiteradamente al cuadrado un número decimal, la única forma de mejorar la calidad del resultado es mantener una precisión mayor en todas y cada una de las fases del cálculo.

Un nivel de precisión de ocho o nueve dígitos es holgadamente suficiente para casi todos los trabajos de carácter numérico. Bastaría para cuadrar problemas contables siempre que las cantidades manejadas no superaran en mucho el millón. Ninguna constante de la naturaleza se conoce con precisión superior a 12 dígitos significativos. No

obstante, incluso para presentar el resultado final con exactitud moderada, puede requerirse una precisión mucho mayor durante el desarrollo de los cálculos. Al elevar 1,0000001 al cuadrado por 27 veces consecutivas, si se pretenden lograr resultados finales correctos hasta la décima cifra, es necesario que todos los cálculos intermedios se realicen con precisión de 15 cifras.

La constante búsqueda de números primos, cada vez mayores, nos da ejemplos de cálculo donde la necesidad de cabal exactitud es imperativo absoluto. Durante muchos años, antes del advenimiento de los ordenadores digitales, el máximo de los números primos conocidos era $2^{127} - 1$, que requiere 39 cifras para expresarse en la forma decimal habitual. Con ayuda de ordenadores, a partir de 1952, el récord se ha batido ya 16 veces; en la actualidad lo detenta un número de 39.751 cifras ($2^{132.049} - 1$). Al comprobar el carácter primo de un número (es decir, al determinar si el número en cuestión puede o no dividirse por números distintos de sí mismo y de la unidad), todos los cálculos aritméticos tienen que ser exactos.

Otro problema de rancio abolengo que exige muy alta precisión es el de calcular el valor de "pi". Durante muchos años, el titular del récord fue el matemático inglés William Shanks. Trabajando a mano, Shanks llegó a calcular 528 cifras correctas (más otras 179 incorrectas). En la actualidad, el valor de pi se conoce con 8.388.608 cifras.

Dado que la mecanización del cálculo aritmético de alta precisión comenzó hace más de 30 años, y en vista de que la potencia de cómputo es cada vez más barata y más fácil el acceso a ella, pudiera esperarse que la lista de resultados conocidos fuera bastante extensa. En realidad, la relación de números conocidos con alta precisión es de una parquedad sorprendente:

La raíz cuadrada de 2 se conoce con un millón de cifras decimales y, la raíz cúbica de 16, hasta la milésima cifra.

La raíz real de la ecuación de Wallis, $X^3 - 2X - 5 = 0$, se conoce con precisión de 4000 cifras. (Tal ecuación fue elegida por el sabio inglés John Wallis para ilustrar el método de Newton de resolución numérica de ecuaciones, y ha servido desde el siglo XVII para poner a prueba muchos otros métodos de aproximación.)

Harry L. Nelson, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (quien anteriormente detentó, *ex-aequo* con David Slowinski, de la misma institución, el récord del máximo número

1.0000001

1.00000020000001

1.0000004000000600000040000001

1.000000800000280000056000007000000560000028000000080000001

1.000001600001200000560001820004368000800800114400012870001144000800800
0436800018200000560000012000000160000001

1.000003200004960004960003596002013760906192336585705183028048806451225290
245025792874737364714356565722780108044657227671435634737362257928529024448
64512242804880105183003365856090619202013760035960000496000004960000032000
0001

1.000006400020160041664063537676245194974430121663461681220599659328917561
102456016742359779559107208715427501663354524863006088759570934516112681199
153831856914237352901072595710907723235985870855649116615937335679742011161
434343572772188085733555689437511105995105806963778061809682674493540378O3
99083454638968579161289551024136215303148046482901272501914064547774155796
971321757005849546165430121619949743687624512063537600416640002016000000640
000001

1.000012800081280341377066802645669423620652593817045586724716639752509356
370660496688786863233980858666587877408486616928888599507374476547533451 68
002963740073746995710556007241670099300929440107854408072554911252317789 92
849980801309396592757494113324438154763359844908980286908211809446877601 78
266511869228209004751039990940280045411637406975397338884283676755932544 23
047914478918135752102429288143361653459171040814216776401746346343970859 72
839009540706607815241562535966383451324140370946893647800306536699175793 20
392634955460025784209902391880928345490689625104448618589291193750025424 34
572320889769109362436235325985158624722403373962502148033363010732930713 92
408811775715101210696782628924296789851669470330413575989281861372471283 44
637482304783585492600325645400029538693329144544905822301135624937328904 58
571501560870702174970266185257957423611226456640106680000341376000812800 00
1280000001

2. *Resultados exactos de las primeras iteraciones*

primo conocido) ha calculado la factorial de un millón, es decir, el producto $1.000.000 \times 999.999 \times \ldots \times 3 \times 2 \times 1$. El resultado tiene 5.565.709 cifras, y ocupa una pila de papel de impresión de 12 centímetros de altura.

Un problema conocido por "problema de 196" ha sido llevado hasta 50.000 pasos de cálculo, punto en que los números con que se trabaja tienen ya 21.000 cifras. Otro desconcertante y apasionante problema, el llamado "problema 3N + 1" se ha estudiado para valores aislados de hasta 1000 cifras. Ambos problemas se comentan más adelante con mayor detalle.

La sucesión de Fibonacci (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, ... donde cada término es suma de los dos precedentes) se ha calculado explícitamente para los 10.000 primeros términos. En el término diezmilésimo, los números constan ya de más de 2000 cifras.

El número de Euler, *e*, base de los logaritmos naturales, se conoce hasta la 125.000ª cifra decimal.

Podríamos mencionar unos cuantos resultados aislados más. Así, R. William Gosper, de Symbolics, Inc., valiéndose de un método basado en manipulación de fracciones continuas, ha calculado 2800 cifras de la raíz séptima de 306. (La raíz no tiene especial importancia; se eligió al azar, al objeto de poner a prueba el método.)

Casi todos los problemas que acabamos de mencionar pertenecen a una categoría donde la necesidad de alta precisión es intrínseca. Suponen un reto porque exigen, justamente, manejar más cifras de las que casi todos nosotros podemos imaginar que lleguen jamás a hacernos falta. Un problema de alta precisión que se plantea con mayor frecuencia, que es más práctico y menos artificial, es el que se presenta al calcular las raíces de una ecuación de segundo grado (una ecuación de la forma $AX^2 + BX + C = 0$). El parámetro $B^2 - 4AC$, llamado discriminante de la ecuación, determina si las raíces serán reales o habrán de ser complejas. Cuando el discriminante sea positivo, las raíces serán reales; si negativo, complejas. En el caso de $B^2 - 4AC$ exactamente igual a cero, la ecuación tiene dos raíces iguales. Por consiguiente, incluso un pequeño error en el cálculo del discriminante puede conllevar una diferencia cualitativa en las soluciones de la ecuación.

Idéntica sensibilidad con respecto a errores pequeños puede suscitarse al resolver sistemas de ecuaciones lineales. Tomemos el sistema

$$\begin{aligned} 53{,}17X - 18{,}91Y - 5{,}67Z &= -174{,}65 \\ -12{,}65X + 36{,}16Y - 47{,}08Z &= 298{,}59 \\ 303{,}80X - 203{,}03Y + 112{,}89Z &= -1769{,}02 \end{aligned}$$

Se ha preparado de modo que sus tres ecuaciones queden satisfechas por los valores $X = -3$, $Y = 2$ y $Z = -4$; pero estos tres valores no representan la única solución. No puede, en efecto haber una única solución, porque aunque ello no salte a la vista, una de las ecuaciones representa un plano que contiene a la intersección de los otros dos. (La tercera ecuación del sistema es igual a cinco veces la primera ecuación menos tres veces la segunda, y no aporta, por tanto, información nueva.)

La imposibilidad de resolver unívocamente el sistema puede descubrirse calculando un valor llamado determinante de la matriz de coeficientes. El determinante de una matriz se calcula formando todas las posibles combinaciones de elementos de la matriz, de modo que no haya en ninguna combinación dos de la misma fila o de la misma columna; se multiplican esos elementos y al producto se le respeta o cambia el signo según una cierta regla. Finalmente, todos los productos se suman. Cuando se halla que el determinante es igual a cero, el sistema de ecuaciones, o bien no tiene solución, o bien, si admite alguna, admite infinitas más; en ambos casos podemos preparar el programa del ordenador para que se detenga en este punto. Aquí, sin embargo, el cálculo del determinante por el sistema llamado "regla de Sarrus", y utilizando en los cálculos aritméticos una precisión de 9 dígitos, no nos da cero, sino −0,000202179. Otros métodos de cálculo pueden producir resultados correctos en este caso, aunque tal vez no en otros. Lo esencial es comprender que con precisión de nueve dígitos el resultado no es de confianza. Además, el sistema de ecuaciones dado aquí es pequeño, y sus coeficientes tienen solamente cinco cifras significativas; cuando el sistema es de mayor tamaño, el problema es más peliagudo.

Hay, en teoría de números y en otras muchas ramas de la matemática, múltiples problemas que exigen representar con extremada precisión números enteros muy grandes. Tenemos un ejemplo en el "problema de 196". Para trabajar con él se toma cualquier entero positivo de dos o más cifras. Escribamos sus cifras en orden retrógrado, y sumemos al primitivo el número así obtenido. Ahora invirtamos el orden de las cifras de la suma, y sumemos nuevamente, iterando el proceso hasta conseguir un número palindrómico, o capicúa, es decir, que sea el mismo número tanto al leerlo de izquierda a derecha como de derecha a izquierda [*véase la figura 4*]. Con casi todos los números iniciales se alcanza pronto un capicúa; la serie que parte de 195, por ejemplo, acaba en tan sólo cuatro etapas. El mínimo de los números que parece no llegar jamás a convertirse en palíndromico por este procedimiento es el 196, que, como ya se mencionó, ha sido infructuosamente sometido a más de 50.000 iteraciones. Hay, entre los 100.000 primeros enteros, 5996 que al parecer no generan capicúas por mucho que se avance en el proceso (si bien no se ha demostrado tal conjetura).

El problema $3N + 1$ se analizó en esta misma sección el pasado marzo. Comencemos por un entero positivo cualquiera, N. Si N es impar, lo sustituimos por $3N + 1$; si N es par, lo remplazamos por $N/2$. El proceso continúa hasta que N sea igual a 1. Por ejemplo, cuando el valor inicial de N es 9, el proceso genera una sucesión de 20 términos: 9, 28, 14, 7, 22, 11, 34, 17, 52, 26, 13, 40, 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2 y 1. Este procedimiento, aunque muy sencillo, suscita muchos misterios. ¿Terminará siempre en 1 esta sucesión, cualquiera que sea el valor inicial de N que se elija? ¿Existe alguna pauta o regularidad en el número de pasos necesarios para llegar a 1, es decir, se podrá predecir el número de pasos necesarios para el descenso hasta 1 con alguna fórmula basada en el valor de N? Dado un número prefijado de pasos, ¿existirá invariablemente un valor impar de N que engendre una sucesión de esa longitud? (Es fácil hallar un valor par de N cuya trayectoria de descenso tenga una longitud cualquiera predeterminada: basta elevar el número 2 a una unidad menos que la longitud especificada.)

En 1980, el autor propuso que el número promedio de términos necesarios para la convergencia en el problema $3N + 1$ está dado, aproximadamente, por $24{,}64\,D - 101$, siendo D el número de dígitos del valor inicial de N. Mi estimación se fundaba en cálculos realizados con números de hasta 200 cifras, que por entonces me parecían ser ya muy grandes. Con un programa para cálculos aritméticos de alta precisión he podido poner a prueba la conjetura para algunos valores mayores. Para números de 1000 dígitos, la fórmula predice la convergencia en 25.539 pasos. Yo descubrí que cuando N es igual al número 1...(998 ceros)...1, es decir, $10^{1000} + 1$, la serie desciende hasta 1 en 23.069 pasos. El número 55...(997 ceros)...1 genera una serie de 24.413 términos. Así pues, basados en estas pruebas preliminares, parece que la tasa promedio de convergencia es predictible y estable.

Otro fenómeno observado inicialmente con valores pequeños de N, y que parece existir al tomar valores grandes, es la tendencia a que muchos valores consecutivos de N engendren series de la misma longitud. Más todavía, parece como si tales cadenas fueran prevaleciendo conforme N aumenta. Por ejemplo, los 230 enteros consecutivos que comienzan por el

912345678912345678900-
000000000000000000001

generan todos ellos series de 997 términos. (Observemos que la predicción dada por la fórmula empírica para este número es de 959 términos.)

Las operaciones aritméticas que puede realizar directamente la unidad central de proceso de un microordenador típico presentan, por lo general, una precisión muy reducida. En muchas máquinas, las únicas operaciones explícitamente suministradas son la adición y la sustracción de enteros cuyas longitudes no excedan de 16 bits, es decir, 16 dígitos binarios. En notación decimal, el máximo número así representado es 65.536, con lo que

	RESULTADO	ERROR PORCENTUAL
CALCULADORA		
Texas Instruments SR-52	674520,6053	0,00146
Hewlett-Packard 33, 67, 41C	674494,0561	0,00540
Sharp Electronics EL506	674492,75	0,00559
Monroe Calculator 1930	674383,1672	0,02183
Texas Instruments 30	674363,69	0,02473
LENGUAJE Y ORDENADOR		
Fortran (CDC Cyber) de doble precisión	674530,5363	0,00000973
Fortran (CDC Cyber) de ocho dígitos	674530,5765	0,00001568
BASIC del Apple II	22723,9709	96,63114
BASIC del ordenador personal IBM	8850273	1212,06423
BASIC de Ontel	8886690	1217,46401

3. Exactitud de algunas máquinas y de algunos lenguajes de programación al iterar la elevación al cuadrado

el nivel de precisión es menor que cinco dígitos decimales. Incluso con los ordenadores más potentes, las precisiones de una o dos docenas de dígitos tan sólo pueden conseguirse mediante programas que combinan muchas operaciones elementales para descomponer un número grande en piezas más reducidas.

Los ordinogramas de la figura 5 esbozan un algoritmo correspondiente a un cálculo de alta precisión: la evaluación del mayor de los números primos conocidos, $2^{132.049} - 1$. El procedimiento se creó pensando en un microprocesador concreto, el 6502, manufacturado por MOS Technology, que se encuentra en ordenadores producidos por Apple Computer Inc., Commodore Business Machines, Inc., y otros muchos fabricantes. Sería fácil adaptar el algoritmo a otros procesadores.

Seguramente, la decisión de más peso al diseñar el programa sea el modo de representación del número en la memoria del ordenador. El procesador tan sólo puede operar valores binarios, mientras que nosotros preferiríamos que el resultado nos viniera dado en forma decimal. Hay una componenda útil, la codificación en sistema binario de las cifras denarias: cada una de las cifras del número decimal se sustituye, una por una, por su expresión binaria equivalente. El 6502 organiza la memoria de los ordenadores que lo utilicen en "octetos", o unidades de ocho *bits*, y por ello es conveniente almacenar números a razón de un dígito decimal por octeto. (Aunque no es el método más eficiente, sí es el más sencillo.)

El primer paso del algoritmo consiste en despejar en la memoria un área de 39.760 octetos, y asignarle a cada uno el valor cero. A continuación se coloca un valor inicial 1 en la zona de trabajo recién despejada, con lo que ésta pasa a constar de 39.759 ceros seguidos por un solo 1. Un contador, necesario para seguimiento y control del cálculo, recibe el valor inicial de cero.

La sección principal del programa consiste en un bucle que repetidamente llama a una subrutina, cuya función es duplicar el número almacenado en la zona de trabajo. Cada vez que se efectúa una duplicación, el contador es incrementado en 1, y el valor que contiene, comparado con 132.049. Si todavía no se ha alcanzado este límite, se vuelve a utilizar la rutina de duplicación; una vez alcanzado el límite, el programa sale del bucle. Finalmente, se resta 1 del valor contenido en la zona de trabajo; y se presenta el resultado.

En el flujograma de la figura, la subrutina de duplicación se señala en

193	194	195	196	197	198	199	200
391	491	591	691	791	891	991	002
1124	685	786	887	988	1089	1190	202
4211	586	687	788	889	9801	0911	
5335	1271	1473	1675	1877	10890	2101	
	1721	3741	5761	7781	09801	1012	
	2992	5214	7436	9658	20691	3113	
		4125	6347	8569	19602		
		9339	13783	18227	40293		
			38731	72281	39204		
			52514	90508	79497		
			41525	80509			
			94309	171017			
			90349	710171			
			187088	881188			
			880781				
			1067869				
			9687601				
			10755470				
			07455701				
			18211171				
			17111281				
			35322452				
			25422353				
			60744805				
			50844706				
			111589511				
			⋮				

4. Evaluación del "Problema de 196" para unos cuantos valores iniciales

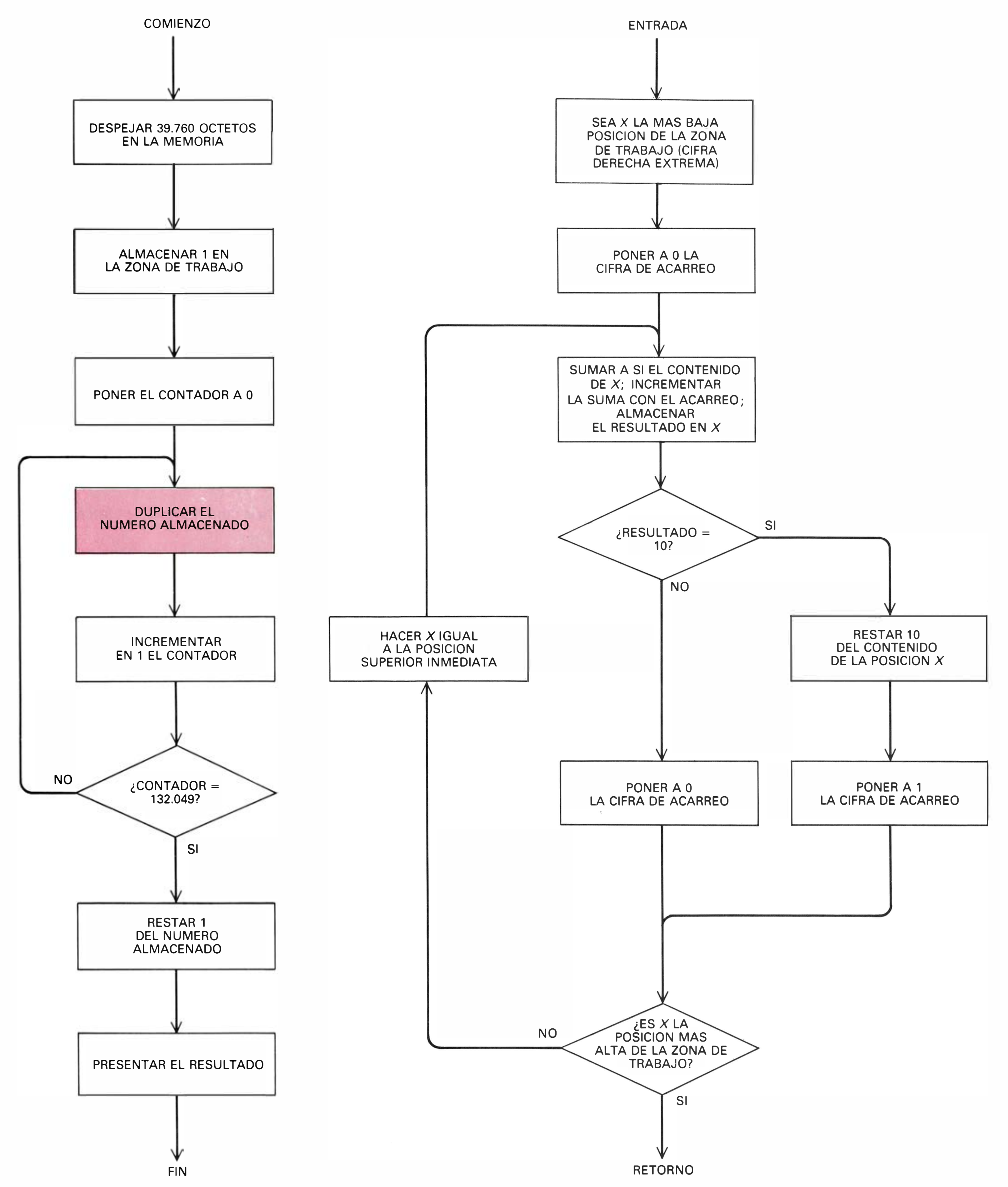
color; las instrucciones que la componen se muestran en el diagrama de flujo de la derecha. Cada vez que se recurre a la rutina, se ajusta un índice (X) a la mínima dirección de memoria de la zona de trabajo, en la cual se almacena el dígito menos significativo –el situado en la posición derecha extrema– del número. El valor alojado en tal dirección se duplica, sumándolo consigo mismo. Lo mismo que al sumar a mano, buena parte de las complicaciones nacen de la necesidad de ir "llevando" de un sumando al siguiente conforme se avanza en la adición. Si las sumas anteriores han generado dígitos de acarreo, es preciso sumarlos al nuevo resultado. A su vez, es preciso comprobar si tal resultado comporta dígitos de acarreo: si la suma es mayor que, o hay que reajustarla restando, 10, pasa el dígito de acarreo a valer una unidad más. Este proceso ha de repetirse con todos los 39.760 octetos de la zona de trabajo.

El procesador 6502 del microordenador Apple II opera a razón de más de 250.000 operaciones por segundo. A pesar de ello, el plan explicado en los diagramas de flujo precisaría 120 horas de funcionamiento para calcularla 132.049-ésima potencia de 2. Hay atajos sencillos que reducen grandemente el tiempo de funcionamiento. Por ejemplo, no es preciso duplicar todas las cifras del área de trabajo en los primeros estadios del cálculo, cuando todas, exceptuadas unas pocas, son ceros. El área de trabajo podría comenzar con una longitud inicial de 150 octetos, e incrementarse en tres octetos cada 10 potenciaciones. Tal estrategia exigiría en sí misma la ejecución de algunas intrucciones más, pero el efecto global sería acelerar la ejecución del algoritmo.

Todos los números que intervienen en el cálculo de $2^{132.049} - 1$ son enteros, pero muchos problemas se analizan mejor expresando las cantidades en la llamada "notación científica", que para ello las descompone en un decimal, llamado mantisa, y un exponente, que da el orden de magnitud en la escala de potencias de diez. Por ejemplo, el número que expresa el año en curso tiene mantisa 1,984, y el exponente es +3; el número completo se expresa $1{,}984 \times 10^3$. Los programas que manipulen tales números con alta precisión son, por necesidad, más complejos que

los que sólo tratan con números enteros, pues ahora cada número consta de varias partes (no sólo mantisa y exponente, sino también sus signos).

En casi todos los lenguajes de alto nivel está prevista la posibilidad de calcular con notación científica; el sistema se llama a veces "aritmética de coma flotante". Los números menores de cierto tamaño se presentan como decimales ordinarios, pero los valores se representan internamente en forma de una mantisa y un exponente. Según sea el espacio asignado a los diversos elementos, así será la precisión de los números, y la amplitud de la gama de valores que pueden representarse. Al darle a la mantisa más espacio se mejora la precisión; mayores exponentes permiten ampliar la gama de los números representables. La versión del



5. Ordinogramas para calcular el número $2^{132049} - 1$, que es primo y tiene 39.751 cifras

BASIC incorporado en Apple II tiene un nivel de precisión fijo, de unos nueve dígitos.

Para conseguir precisiones apreciablemente mayores, nuevamente es obligatorio valerse de soluciones por programación. Herman P. Robinson, que perteneció al Lawrence Livermore, ha preparado una batería de programas proyectados para el cálculo de alta precisión en notación científica, redactados en el lenguaje de máquina del microprocesador 6502. Los programas pueden funcionar a cualquier nivel de precisión hasta 600 cifras decimales, y permiten utilizar exponentes de hasta 9999. La elección de estos límites responde a ciertas características del procesador. Una mantisa de 600 cifras, más un exponente de cuatro dígitos, más sus signos, pueden alojarse en 256 octetos. En el 6502, ese bloque de octetos es una "página" de memoria.

En los programas de Robinson, entre las operaciones que pueden realizarse sobre los números se cuentan las aritméticas elementales, así como las logarítmicas, exponencial, radicación cuadrática y diversas funciones trigonométricas. También se proporcionan funciones menos habituales, tales como las transformaciones de Euler y de van Wijngaarden para sumación de series lentamente convergentes. Registrados en la batería de programas están los valores de unas 26 constantes y de unos 8000 números primos. Pueden utilizarse a modo de calculadora de sobremesa de extraordinaria precisión, y las funciones que incorporan pueden llamarse desde un programa. Las versiones preliminares indican que las operaciones aritméticas y las funciones son exactas hasta el límite de las 600 cifras.

A quienes se interesan por los cálculos numéricos, el primer contacto con el ordenador digital les resulta muchas veces descorazonador. Dado que las operaciones elementales de la máquina son rápidas y esencialmente impecables, se tiene, ingenuamente, la expectativa de que podrán realizarse con facilidad complicados análisis numéricos. Se siente uno muy desencantado al saber que la raíz quinta de 100 (cantidad que los astrónomos conocen por "un orden de magnitud") no puede determinarse con precisión mucho mayor que la de una calculadora manual. Una batería de programas como los de Robinson da cumplimiento a algunas de las promesas del ordenador. La raíz quinta de 100 puede calcularse hasta la centésima cifra decimal en cosa de minutos.

Taller y laboratorio

Física del inigualable helado casero que prepara la abuela

Jearl Walker

El helado que mi abuela elabora es el mejor del mundo. Para mí. Se sirve de un viejo cacharro en el que se baten, movidos por una manivela, los ingredientes. Durante y después del batido, la mezcla se enfría y endurece en un baño de hielo, agua y sal gema que rodea al recipiente. El resultado es un postre irresistible: un helado cremoso y fluido.

La heladera de mi abuela consta de tres componentes principales. Un recipiente metálico, donde se introducen los ingredientes, se ajusta dentro de un cubo de madera, mucho mayor. Penetra, en el recipiente, un agitador movido a mano a través de una manivela. El espacio entre el recipiente y el cubo se llena de sal gema y hielo picado, dispuestos en capas alternativas, de suerte que haya unas cuatro veces más hielo. Recubre el conjunto para protegerlo del calor ambiental. Agita entonces la mezcla durante unos 20 minutos hasta que se torna muy viscosa. Luego, repone el hielo y la sal, cubre el cacharro con una toalla gruesa y lo deja enfriar y endurecerse durante dos o tres horas. El helado queda así listo para la mesa.

A la hora de estudiar el proceso me he decidido por una de las recetas de mi abuela relativa a un helado de contenido medio en vainilla. En la figura 2 se reseñan los ingredientes para un litro y medio. Se calienta la nata, a la vez que se remueve y añade azúcar. Esta mezcla se sigue calentando y removiendo, sin permitir que hierva. Una vez caliente y con el azúcar totalmente disuelto, se deja enfriar hasta la temperatura ambiente y se añade entonces el extracto de vainilla. La mezcla se vierte seguidamente en el recipiente de la heladera y se mantiene en el frigorífico una hora al menos. A continuación, se instala el recipiente en el cubo y se introduce el agitador, se hace el relleno de hielo y sal en torno al recipiente y se le da a la manivela.

Durante muchos años me han tenido intrigado varios aspectos del procedimiento. Comprendo que, sin hielo, la mezcla no pueda convertirse en helado, pero, ¿es realmente necesaria la sal? ¿Por qué advierte mi abuela que no hay que añadir demasiada? ¿A qué viene triturar el hielo? Admito que el cubo sea de madera para reducir la absorción de calor del medio ambiente; pero, ¿tiene que ser metálico el recipiente? ¿Sirven los ingredientes para otra cosa que no sea hacer apetitoso el helado? Me he preguntado también (especialmente durante mis largos ratos de manivela) por qué hay que remover el helado. (Sin duda está perfectamente mezclado antes de verterlo en el recipiente.) ¿Por qué activar la agitación conforme aumenta la viscosidad? Por último, ¿por qué se estropea un helado si se deja derretir y se vuelve a enfriar?

La explicación de mi abuela acerca del objeto de la sal gema me desconcertó. Según ella, con la sal se rebaja la temperatura del hielo y el helado se congela antes. Acaso tenga razón, pero la idea parece contradecir otra aplicación muy corriente de la sal. Cuando hay que limpiar de nieve las aceras, éstas se rocían de sal, que no tarda en actuar. Entonces, si la sal se limita a disminuir la temperatura del hielo, ¿cómo puede usarse para fundir la nieve de las aceras? Y al revés, si en una heladera la sal simplemente funde el hielo, ¿cómo puede acelerar la congelación de la mezcla?

Para indagar alrededor de esta cuestión comenzaré ocupándome de la congelación del agua del grifo (dejando de lado la posibilidad de sobreenfriarla, es decir, de hacer que su temperatura descienda por debajo del punto de solidificación normal sin que se hiele). Emplearé un sencillo modelo de enfriamiento en el cual se elimina energía (calor) a expensas de la energía cinética de las moléculas del líquido. Al disminuir éstas de velocidad, baja la temperatura del agua. Cuando se llega al punto de solidificación (cero grados Celsius), se inicia en la superficie la formación de hielo. Al extraer más energía se hiela más agua, pero la temperatura no puede bajar hasta que no haya solidificado todo el agua.

Imaginemos un estado intermedio en el que el agua esté helada sólo en parte. Si aquí aislamos la mezcla para que no escape más energía, permanecerán constantes tanto la temperatura como la cantidad de hielo; pero las moléculas seguirán moviéndose, unas lentamente y, otras, rápidamente. En la frontera entre el líquido y el hielo, parte de las moléculas se hallará, además, cambiando de estado. Así, algunas moléculas de la fase líquida se moverán con lentitud suficiente para que, al chocar con el hielo, se queden en él, sumándose al mismo. A la vez, algunas moléculas de la fase sólida (el hielo) se soltarán y entrarán en el líquido. O sea, cuando el sistema esté aislado, se llegará a un estado de equilibrio tal que las velocidades de solidificación y de fusión se igualarán en la interfase.

En este modelo, un factor importante es la energía que se intercambia en la solidificación y en la fusión. Toda molécula de la fase líquida que se adhiera al hielo perderá energía; por dos razones. Primero, debe aminorar de velocidad, ya que de lo contrario su energía cinética la llevaría enseguida muy lejos del hielo. Segundo, cuando la captan las fuerzas eléctricas de las moléculas de hielo más próximas, pierde aún más energía. Cuando se hiela un gramo de agua, la cantidad de energía que pierden en conjunto las moléculas que pasan al hielo es de 80 calorías.

Cuando una molécula abandona la fase sólida, se cumple lo contrario. Así, deberá recibir energía suficiente para escapar a las fuerzas que ejercen sobre ella las moléculas vecinas y para adquirir una energía cinética adecuada a la fase líquida. Entonces, para fundir un gramc de agua, habrá que aportar 80 calorías si queremos liberar del hielo a las moléculas. Por ello, cuando en el agua de hielo se llega al equilibrio, la

cantidad de energía que ceden las moléculas que pasan al hielo iguala a la que absorben las moléculas que lo abandonan. En la interfase hielo-líquido no existe intercambio neto de energía.

Supongamos ahora que extraemos una pequeña cantidad de energía de un sistema que esté en equilibrio con la mitad del agua helada. Con ello decrecerá la velocidad media de las moléculas de la fase líquida y aumentará la rapidez de solidificación en cuanto las moléculas, ahora más lentas, comiencen a adherirse en el hielo. En este período, la rapidez de solidificación superará el ritmo de fusión y habrá una liberación de energía no nula.

Pero esa energía no desaparece, sino que se pone de manifiesto (mediante choques) en la energía cinética de las moléculas que siguen en la fase líquida. Estas no tardan en recibir energía suficiente para que sean menos las que pasan al hielo. Se habrán igualado las velocidades de solidificación y fusión y se restituirá el equilibrio.

Cada vez que se extrae una pequeña cantidad de energía del sistema, se perturba el equilibrio. Esa eliminación de energía decelera unas moléculas que pasan al hielo. Y, tras cada eliminación, se restablece el equilibrio del sistema. Finalmente, si se extrae energía suficiente, todas las moléculas estarán en la fase sólida. Pero, aún en tal estado, las moléculas se mueven, oscilando en torno a sus posiciones de equilibrio en la red cristalina del hielo. A partir de ahí, toda extracción de energía aminorará la oscilación y la temperatura comenzará de nuevo a bajar.

Volvamos al estado en que la mitad del agua era hielo. Agregando sal al líquido, el equilibrio se destruye momentáneamente. Aunque la molécula de agua sea eléctricamente neutra, posee un campo dipolar eléctrico intenso, por estar sus átomos dispuestos en *V*. En un modelo simple de esta molécula, el átomo de oxígeno, que ocupa el vértice de la *V*, atrae hacia él los electrones de los átomos de hidrógeno. Tal movimiento separa los centros de las cargas positivas y negativas de la molécula. De este modo, puede considerarse que el extremo del oxígeno es más negativo que los del hidrógeno.

Este campo eléctrico de las moléculas de agua disgrega los cristales de sal en iones sodio positivos e iones cloro negativos. Estos iones están rodeados todos de un racimo de moléculas de agua. En torno a un ion sodio hidratado (Na^+) las moléculas de agua tienen tendencia a presentar sus extremos oxigenados hacia el mismo. En torno a un ion cloro negativo (Cl^-) la mayoría de las moléculas de agua presentan hacia el mismo sus extremos de hidrógeno. Entre las moléculas de agua de estos racimos hay algunas tan firmemente sujetas que les es imposible helarse.

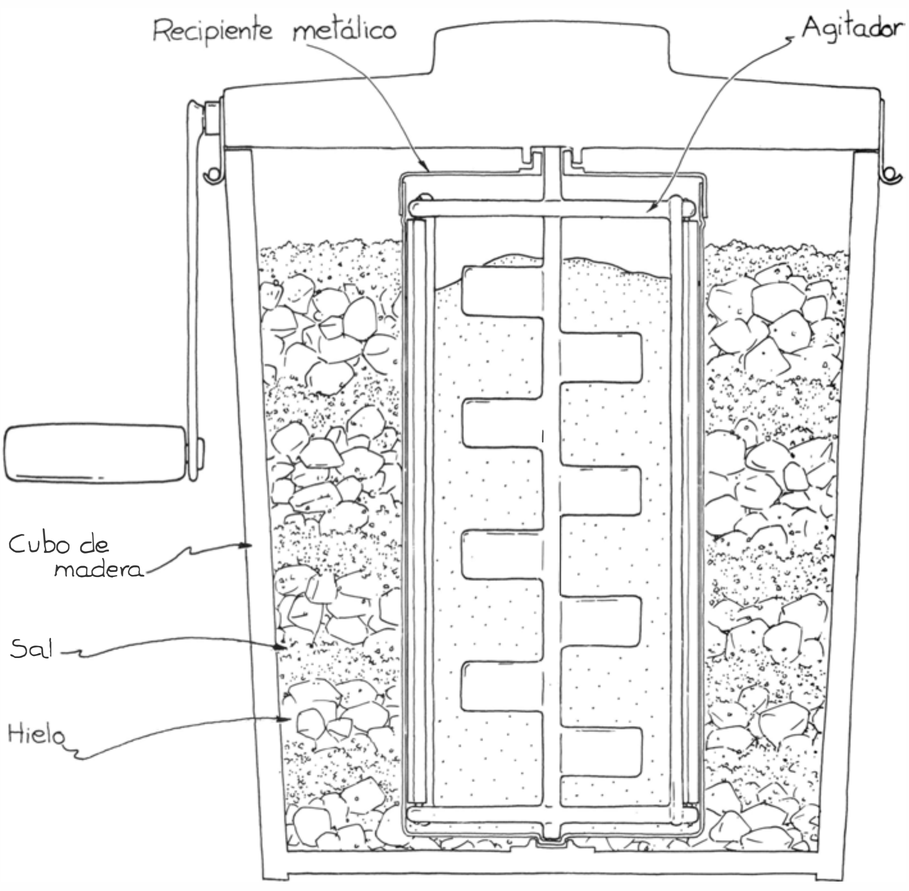
En este caso, en algunas de las colisiones de la interfase líquida intervienen esos racimos, los cuales no pueden quedarse en el hielo. Así es como la adición de sal destruye el equilibrio en la interfase, pues los racimos disminuyen la frecuencia a la que en la fase sólida penetran moléculas de agua. Mas la frecuencia a la cual la abandonan no se altera y, por ello, el hielo comienza a fundirse.

A la fusión la acompañan dos efectos; ambos incrementan la velocidad de solidificación, de modo que ésta vuelve a igualarse a la de fusión. El agua, al fundirse, diluye la solución salina, elevando la posibilidad de que en las colisiones en la interfase intervengan moléculas de agua y no iones hidratados. Además, la fusión rebaja la temperatura del sistema, ya que a toda molécula liberada del hielo deben cederle energía las moléculas del líquido. Este, al perder energía, se enfría.

Cuando en una acera se esparce sal sobre el hielo, el sistema de agua de hielo salina es diferente, pues no está aislado. Aquí acontece que, aunque el agua empiece enfriándose al ceder energía para la fusión, la acera y el aire circundante reponen enseguida la energía perdida. Y, así, la temperatura permanece constante mientras se funde el hielo.

A menudo, la finalidad de la sal se formula en función del punto de solidificación del agua de hielo. Cuando se agrega sal, el punto de solidificación del agua desciende por debajo de su valor normal de cero grados Celsius. Con ello, el proceso de congelación se extiende entre unos márgenes de temperaturas bastante amplios. En la figura 6 se representa gráficamente la temperatura del agua de hielo salina en función de la salinidad del líquido, medida ésta en partes por 1000, concretamente en gramos de sal por 1000 gramos de líquido. La curva representa los valores de equilibrio para los cuales se contrarrestan las velocidades de solidificación y licuación.

Para entender cómo se hiela el agua salina, lo mejor es comenzar con un líquido de salinidad baja. Cuando se extrae energía de esta mezcla, enfriándo-



1. *Heladera manual*

1 litro — mitad y mitad o nata ligera

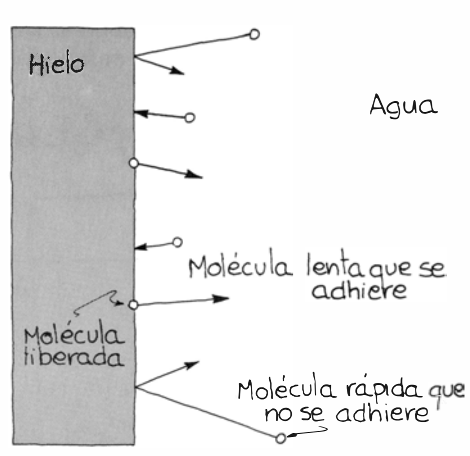
1 copa — azúcar

2 cucharaditas — extracto de vainilla pura

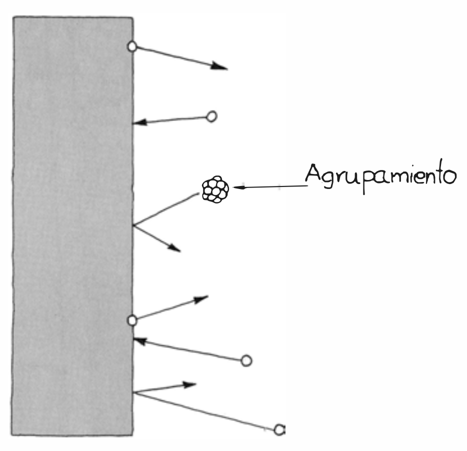
2. Ingredientes de un helado de vainilla

la, su temperatura acaba descendiendo por debajo de cero grados centígrados; pese a ello, no se hiela. El punto de solidificación de esta mezcla es inferior en varios grados al del agua dulce, y se dice que la adición de sal lo rebaja.

Cada vez que se extrae energía del sistema, la velocidad de congelación aumenta con respecto a la de fusión y parte del agua se hiela hasta que ambas velocidades se igualan. Entonces, por disminuir el volumen de agua líquida, aumenta la salinidad. Al seguir enfriando el sistema y perturbando su equilibrio, se restablece éste desplazándose curva abajo.



3. Equilibrio en el agua de hielo



4. Equilibrio en el agua de hielo salina

Al final, el sistema alcanza un estado, llamado punto eutéctico, en el que un enfriamiento adicional produce su solidificación en hielo y cloruro sódico hidratado. La temperatura del punto eutéctico depende del tipo de sal. Para el cloruro sódico es del orden de −21,1 grados Celsius, si la salinidad es de 233 partes por 1000. El punto eutéctico de una solución de cloruro cálcico es de −55 grados Celsius, por cuya razón el cloruro cálcico es mucho mejor que el sódico para deshacer el hielo de las aceras en tiempo frío. El cloruro cálcico rebaja el punto de congelación del agua más que el cloruro sódico.

El mismo tipo de gráfica sirve de pauta para añadir la sal al hielo de una heladera. Supongamos que se haya añadido una pequeña cantidad de sal, de modo que el agua de hielo salina se encuentre aproximadamente en equilibrio no muy por debajo de cero grados Celsius. En la figura 7 este punto se señala por la letra A. Aquí, como la temperatura no es muy baja, la mezcla de helado se hiela lentamente. Y, como accionar la manivela resulta pesado, decidimos añadir más sal al hielo.

La adición de sal destruye momentáneamente el equilibrio del sistema, pues el nuevo aporte de iones sodio y cloro reúnen en enjambres nuevas moléculas de agua. Habida cuenta de que la velocidad de solidificación decrece, parte del hielo se licúa a la par que el sistema tiende a recuperar el equilibrio. Y, puesto que el sistema está casi aislado, la energía necesaria para la fusión debe provenir de la energía cinética de las moléculas de agua. Estas aminoran de velocidad y, con ello, disminuye la temperatura.

Finalmente, se funde hielo suficiente para que vuelvan a igualarse las velocidades de solidificación y fusión. Así se restablece el equilibrio, pero en un punto más bajo de la curva. Pese a la fusión de parte del hielo, la salinidad es ahora mayor que al principio a causa de la sal añadida. Más importante es que la temperatura sea ahora menor merced a la eliminación de energía durante el proceso de fusión.

En la heladera, el agua de hielo salina no constituye un sistema aislado: hay una fuga de energía, a baja velocidad, a través de las paredes de madera. Pero de la mezcla que se pretende helar sale aún más energía. Así y todo, lo notable es que la adición de sal al hielo resta temperatura licuando parte del mismo. De este modo, el baño líquido frío podrá extraer energía del recipiente que encierra a los ingredientes. Ese agua de hielo salina permanecerá fría aunque la mezcla de helado prosiga cediéndole energía. Y el recipiente debe ser metálico para que la energía pueda transmitirse al baño, enfriando así la mezcla de helado, en un tiempo adecuado.

A fin de comprobar la capacidad de la sal para rebajar la temperatura del agua de hielo, me serví de un termo lleno de ésta a la que agregué la sal. Para registrar la temperatura utilicé un termopar no engastado de tipo K, conectado a un termómetro termoeléctrico. Conforme añadí más sal, el hielo se fundió y la temperatura cayó hasta −15 grados C, punto en el que se detuvo, presumiblemente porque se escapaba calor al termo.

¿Es adecuado el hielo común para congelar un helado? Sí, en la hipótesis de que la cantidad del mismo permita un buen acoplamiento con el recipiente. El hielo en cubitos no forma el relleno idóneo. El hielo picado se ajusta más, aunque no lo suficiente para que el tiempo de agitación sea aceptablemente corto. Lo cierto es que, en este caso, ese tiempo podría durar hasta que de la mezcla se separara la mantequilla y se malograra el helado. Con el recipiente rodeado de un baño de agua de hielo se consigue un contacto muchísimo mejor; pero, sin sal, el baño no puede estar a menos de cero grados Celsius.

Con sal en el baño, el recipiente estará rodeado de un líquido a una temperatura inferior a cero grados Celsius. Cuanto más echemos, menos temperatura. Pero mi abuela aconseja no añadir demasiada sal, para no estropear el helado. La relación entre sal y hielo debe ser del orden de 1:4. Mayor cantidad de sal crea una temperatura excesivamente baja en el baño de hielo y agua. Entonces, como la diferencia entre las temperaturas del agua de hielo y de la mezcla de helado será mayor, a través de la pared del recipiente se transmitirá calor a mayor velocidad. Dentro de la mezcla de helado el calor no se transmite, sin embargo, con la misma rapidez; la capa de la misma contigua a la pared se enfriará y helará enseguida, pero no así la masa de mezcla más alejada de la pared.

La agitación de la mezcla sirve para impedir que se hiele prematuramente la capa exterior. Aun así, si el baño de hielo y agua está lo bastante frío, puede que se inicie una congelación antes de tiempo. Entonces costará rotar el agitador, aunque el centro del helado no haya adquirido todavía la

viscosidad necesaria. Quien esté accionando la manivela, engañado por la resistencia de ésta a girar, creerá que la mezcla estará suficientemente batida y la dejará reposar un rato. En consecuencia, crecerán los cristales de hielo, dando al producto una textura granulosa y dura.

Al principio, los ingredientes ocupan aproximadamente el 70 por ciento del recipiente. Al agitar la mezcla, ésta se dilata hasta llenarlo, en parte porque el agua aumenta de volumen al solidificarse. Sin embargo, semejante dilatación se debe, en mucho mayor grado, al aire que el batido introduce en la propia mezcla.

Al comenzar a remover, acciono lentamente la manivela porque la viscosidad de la mezcla es demasiado baja para atrapar burbujas de aire y un accionamiento enérgico significaría un esfuerzo superfluo. Además, no es mi deseo separar la mantequilla de la nata. Cuando la solución se ha enfriado y espesado, hay que mover más rápido la manivela para introducir burbujas de aire en la mezcla. Estas quedan atrapadas por la viscosidad y la congelación; su efecto es aligerar el helado, pues de lo contrario nos saldría tan denso como el hielo.

La mezcla para el helado se prepara en caliente, al objeto de que el azúcar y los demás ingredientes se disuelvan y se mezclen a fondo. Evidentemente, si sigue caliente cuando se introduzca en la heladera, el baño de agua de hielo salina deberá eliminar una cantidad de calor mucho mayor. He aquí por qué hay que enfriar la mezcla, el agitador y el recipiente en la nevera durante una hora, o quizá más.

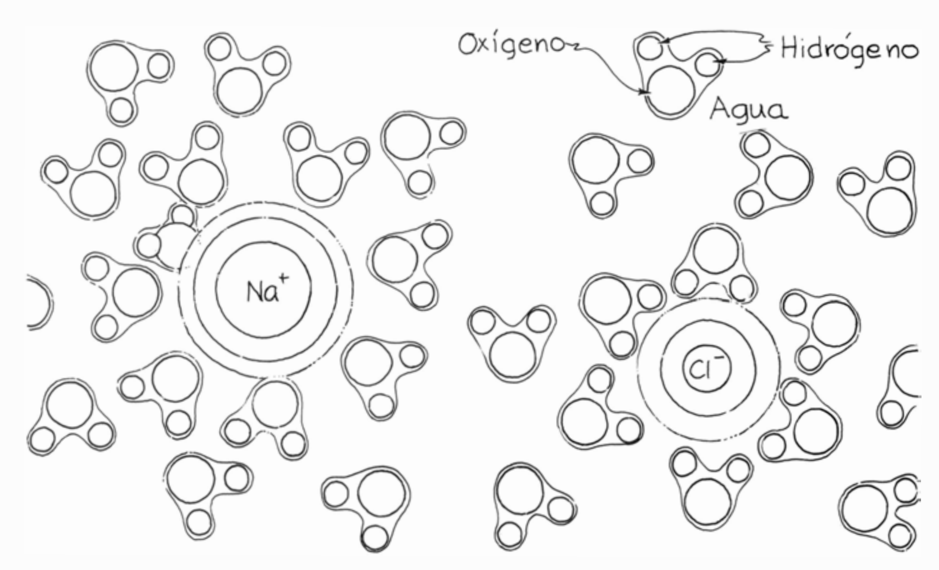
Cuando la mezcla se hiela sin remover, resulta granulosa. Esta diferencia en la textura final se debe al crecimiento de los cristales de hielo. Supongamos que la mezcla se enfríe y hiele lentamente en un congelador. Aparecerán cristales de hielo diminutos, que se desarrollarán a medida que de la mezcla se separe agua y cristalice en tales puntos. Cuando el helado se haya solidificado del todo, estará lleno de cristales de hielo de gran tamaño.

Cuando una mezcla de helado se revuelve a la vez que se congela, los cristales resultan mucho más pequeños. La remoción desorganiza el proceso de cristalización; ya no predominan los puntos de nucleación originales. Antes bien, habrá muchos más puntos con oportunidad de iniciar un cristal. La mezcla se solidificará en múltiples cristalitos, no en unos cuantos de gran tamaño. El resultado será un helado suave y fluido.

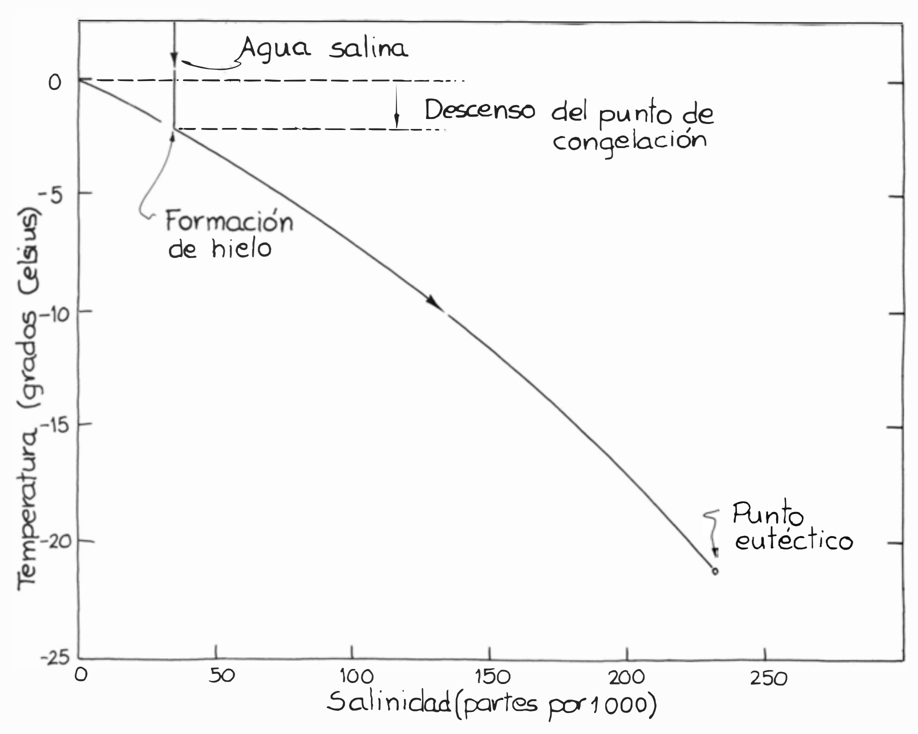
La remoción evita asimismo la formación de cristales de hielo grandes por otro mecanismo. El recubrimiento de los cristales recién formados de parte de la nata de la solución se opone a que llegue más agua a la superficie de los mismos. Así se retrasa el crecimiento cristalino y pueden aparecer cristales nuevos. La leche, los huevos, la miel y la gelatina coadyuvan también a retardar el crecimiento de los cristales.

Cuando se elabore un helado recurriendo al congelador de una nevera hay que revolver la mezcla de tanto en tanto con una batidora. Procedimiento que rompe los cristales y los cubre de nata y, adicionalmente, introduce burbujas de aire en la mezcla.

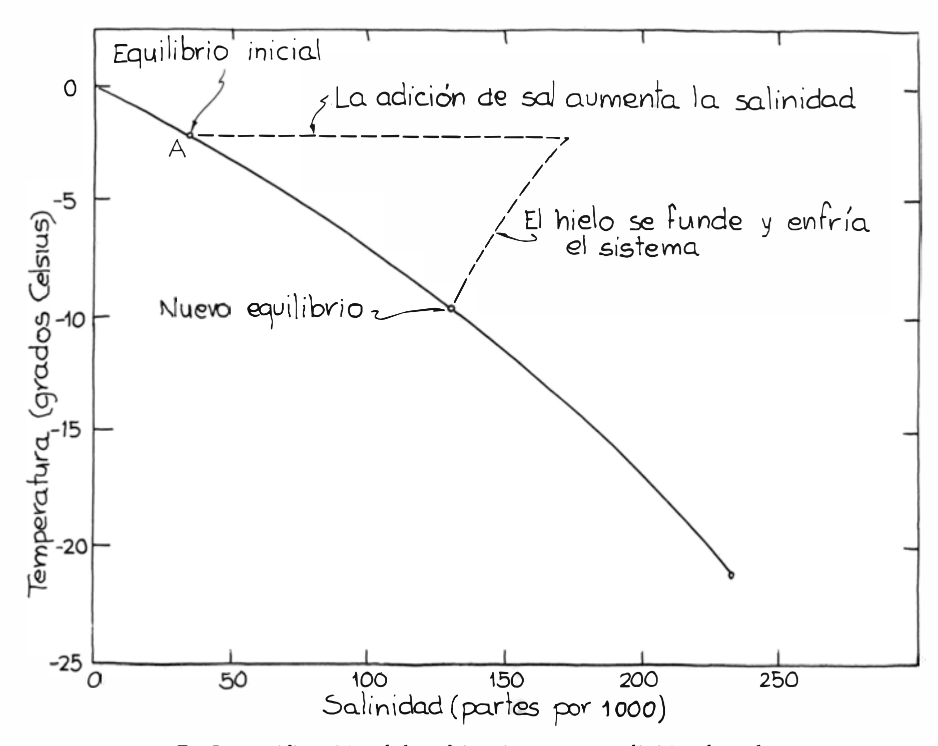
He llevado a cabo algunas experiencias sencillas en torno a los helados. Siguiendo la receta de mi abuela preparé una cantidad que repartí entre dos cuencos. Los cubrí con papel de aluminio y los guardé en el congelador, mantenido aproximadamente a −12 grados Celsius, frío suficiente para solidificar un helado. Cuando en las orillas de las mezclas comenzó a formarse hielo, reti-



5. Iones sodio (Na^+) y cloro (Cl^-) hidratados



6. Qué ocurre cuando se congela el agua de hielo salina



7. Intensificación del enfriamiento por adición de sal

ré una de ellas y la removí durante varios minutos con una batidora a baja velocidad. La retorné al congelador.

Horas después, ambas mezclas se encontraban completamente heladas. La que había sido batida tenía numerosas burbujas inmovilizadas por la congelación. Al sacar pequeñas muestras con una cuchara pude observar cristales de hielo de dos o tres milímetros de longitud, lo que bastó para que pudiera notarlos cuando me llevé el helado a la boca. Sentí y oí el crujido de los cristales entre mis dientes.

La mezcla no removida estaba endurecida por el hielo. Además, su gran densidad se debía a que carecía de burbujas de aire. Al abrirse camino en el hielo, la cuchara hacía ruido y, cuando me llevé una porción a la boca, algunos trozos de hielo resultaron demasiado grandes para mascarlos sin dificultad. Comer aquella materia fue como masticar cubitos de hielo. Cuando fundí un helado en buenas condiciones y volví a congelarlo, obtuve idéntico resultado.

Comparé ambas mezclas con otras que elaboré según la misma receta y que removí convenientemente. Batí una en un cacharro igual al de mi abuela, pero con accionamiento eléctrico. Preparé la otra en una heladera eléctrica que me prestó Peter Renz. Esta máquina cabe en el congelador de un frigorífico saliendo al exterior su cordón de alimentación para enchufarlo en una toma de pared. (La junta de goma de la puerta del congelador se ajusta perfectamente alrededor del cordón.) Para acelerar la congelación está equipada de un ventilador que lanza el aire por encima del helado.

Mientras que mi máquina de hielo salino necesita unos 20 minutos de batido para hacer un helado, la de ventilador necesita más de una hora. Ambas confeccionan un helado fluido y ligero, en el que pueden verse cristales de hielo y burbujas de aire cuando se examina con una lupa.

Es posible estudiar otros postres parecidos al helado. Los sorbetes, que acostumbran a componerse de un zumo de fruta y diminutos trozos de cáscara de frutas, carecen de la nata que llevan los helados. Es necesario batirlos o agitarlos, pues el crecimiento de los cristales de hielo puede hacerlos granulosos y duros. Aquí la dificultad puede ser mayor, ya que muchos sorbetes carecen de un ingrediente que cubra los cristales y retrase su crecimiento.

Otros sorbetes se preparan de modo parecido, pero reduciendo una fruta a papilla y combinándola con jarabe de azúcar. Los granizados son casi iguales, pero no se baten ni agitan para que, adrede, posean unos cristales de hielo grandes. Cuando la mezcla se encuentre en proceso de congelación hay que removerla periódicamente con un tenedor a fin de que resulte áspera por los cristales, pero no aterronada por cubos de hielo.

Libros

Pensamiento científico, fago lambda, medicina laboral, cromodinámica cuántica y relatividad

J. Fernández Prida, T. G. Villa y J. R. Villanueva,
E. Rodríguez Ocaña, R. Pascual y L. Mas

EL PENSAMIENTO CIENTÍFICO. CONCEPTOS, AVANCES, MÉTODOS, por Y. Bar-Hillel, M. Bunge, A. Mostowski, J. Piaget A. Salam, L. Tondl, S. Watanabe. Traducción de J. Ezquerro y M. A. Quintanilla. Cuadernos de filosofía y ensayo. Tecnos, 1983. Por invitación de la Unesco, siete célebres especialistas en los temas tratados, que abarcan campos tan dispares como la filosofía, la matemática, la física, la biología, la cibernética, la lingüística, la semiótica y la teoría de la información, exponen sus opiniones acerca de algunos de los conceptos, métodos y procedimientos que han servido de guía a muchos de los descubrimientos científicos del presente siglo.

Andrzej Mostowski, experto en el área de los fundamentos de las matemáticas, expone en su artículo *Conjuntos* el papel que esta noción ha desempeñado en la matemática a través de los siglos, especialmente a partir de los trabajos de B. Bolzano, G. Frege y, sobre todo, de G. Cantor, considerado como el padre de esta rama de la matemática. Cantor parte, sin embargo, de una noción vaga e imprecisa de la noción de conjunto, lo que da lugar a que en su teoría aparezcan no sólo paradojas, sino auténticas contradicciones. El primer intento de evitar la inconsistencia de la teoría de conjuntos es debido a A. N. Whitehead y B. Russell, que introdujeron la denominada teoría de tipos, en cuyo lenguaje no son formulables las paradojas. Un camino distinto fue el seguido por E. Zermelo, que en 1908 publicó la primera presentación axiomática de la teoría de conjuntos, basada en un lenguaje con un único símbolo específico, que denota la relación de pertenencia. La noción de conjunto queda no sólo indefinida, sino incluso ampliamente indeterminada, ya que los axiomas de la teoría poseen modelos muy distintos. La teoría de Zermelo, posteriormente modificada por A. Fraenkel y T. Skolem, desempeña un papel central en la fundamentación de las matemáticas. Otra axiomatización de la teoría de conjuntos, con ventajas sobre la anterior al poseer un número finito de axiomas, pero también con ciertos inconvenientes, es debida a J. von Neumann, P. Bernays y K. Gödel, evitándose en ella las paradojas mediante la distinción entre conjuntos y clases.

Como consecuencia de que una amplia clase de funciones computables puede ser representada tanto en la teoría de Zermelo-Fraenkel (ZF), como en la de von Neumann-Bernays-Gödel (NBG), ambas resultan ser incompletas, pudiéndose encontrar proposiciones, relativamente sencillas de formular, que no pueden ser refutadas ni demostradas. Tal es, por ejemplo, el caso de la hipótesis del continuo, al existir modelos de ZF y NBG en los que se verifica (Gödel, 1938) y otros en los que es falsa (Cohen, 1963). Otros ejemplos de proposiciones indecidibles son las referentes a la existencia de cardinales inaccesibles, cuya investigación fue iniciada por Mahlo alrededor de 1912. Por otra parte, la incompletitud de la teoría de conjuntos no puede ser evitada añadiendo nuevos axiomas, ya que cualquier extensión recursiva de los axiomas de ZF y NBG da lugar a una teoría incompleta o inconsistente (Gödel, 1931).

Un último aspecto de la teoría de conjuntos analizado por Mostowski es el referente a su consistencia. De acuerdo con un conocido resultado de Gödel, si ZF está libre de contradicción, una demostración de su consistencia no puede ser formalizada en ZF. Y puesto que de hecho todos los métodos matemáticos habituales son formalizables en dicha teoría, puede concluirse que con los métodos de demostración usuales no es posible dar una prueba de la no contradicción de la teoría de conjuntos, a menos, por supuesto, que sea contradictoria.

En la actualidad se investigan las consecuencias que para la teoría de conjuntos se derivarían de la adición de nuevos axiomas. Así, la adición de la hipótesis del continuo al conjunto de axiomas acarrea consecuencias que la mayoría de los matemáticos califican de indeseables, ya que, por ejemplo, da lugar a teoremas relativos a particiones del plano euclideo, que contradicen nuestras intuiciones geométricas.

Jean Piaget, célebre por sus investigaciones en el campo de la psicología, aporta un breve capítulo titulado *El concepto de estructura*, en el que analiza las estructuras matemáticas, fundamentalmente las de grupo, retículo y las de naturaleza topológica, así como las estructuras físicas, biológicas, lingüísticas, sociales y psicológicas, dedicando particular atención a la teoría de la Gestalt. El estudio termina con un análisis del estructuralismo y el constructivismo, en el que expone la tentativa del etólogo K. Lorenz de sintetizar el neodarwinismo con la teoría kantiana de las categorías del conocimiento.

Sin entrar en la valoración de los puntos de vista de Piaget acerca de la aportación de las teorías estructuralistas a las distintas ramas de la ciencia, en opinión del recensor el artículo contiene bastantes oscuridades. La concepción bourbakista de la matemática como una teoría de las estructuras resulta en la actualidad un tanto desfasada y algunos de los argumentos para apoyarla probablemente resultarán sorprendentes para el conocedor del tema.

Abdus Salam, profesor de física en el Imperial College of Science and Technology de Londres, aporta al volumen un excelente escrito, claro y ameno, aunque bastante técnico, en el que narra el papel que el concepto de simetría ha representado en el desarrollo de la teoría de las partículas básicas de la materia. Tras analizar las simetrías traslacionales y rotacionales del espacio y el tiempo, que se originan con las teorías de Einstein y Lorenz, el autor expone la tesis básica del artículo: "cada vez que un postulado de simetría no es aparentemente confirmado por los fenómenos naturales, ello es debido a la existencia de una simetría aún más profunda, con la que la primera entra en conflicto". Así, mientras en los años veinte sólo se conocían dos partículas fundamentales, el protón y el electrón, cuya representación espinorial corresponde al grupo O (3), el descubrimiento de nuevas partículas originó un nuevo modelo de simetría, correspondiente a las representaciones irreductibles del grupo SU (3). Cuando a partir de 1964 se plantea la posibilidad de en-

contrar una simetría aún más profunda, que comprendiese tanto el espín externo de Poincaré como el espín unitario interno, las investigaciones se centraron en el modelo de simetría originado por el grupo SU (6), que contiene a SU (2) y SU (3) como subgrupos. El hecho de que existan respectivamente 33 y 56 partículas de las variedades mesónica y nucleónica y que entre las representaciones irreductibles del grupo SU (6) existan dos precisamente con esas dimensiones, no parece ser puramente casual, aun cuando la adopción de este nuevo y más profundo modelo de simetría plantee interrogantes para los que todavía no se ha encontrado una respuesta satisfactoria.

Ladislav Tondl, profesor de metodología de las ciencias en la Academia de Ciencias de Checoslovaquia, en su artículo *Los signos* analiza distintos aspectos de la semiótica, tales como la naturaleza de los signos, niveles de análisis semiótico, signo y significado, signos y máquinas cibernéticas, metodología de la semiótica, etcétera. Como dice Tondl en la primera parte de su escrito, aunque las investigaciones en el campo de la semiótica han sido extensas, las diferencias en las concepciones, enfoque y terminología son enormes, no pudiéndose presentar todavía un conjunto ordenado de resultados científicos.

Yehoshua Bar-Hillel, profesor de lógica y filosofía de la ciencia en diversas universidades, en su artículo *El lenguaje* expone el cambio radical que han sufrido nuestras concepciones en esa materia a partir de la publicación en 1957 de *Syntactic Structures*, primer libro de Noam Chomsky. Tras analizar cuestiones tales como el concepto chomskiano de estructura superficial y estructura profunda de una proposición y plantearse el problema de si la lingüística debe ser considerada como una parte de la psicología cognoscitiva, Bar-Hillel dedica un apartado al estudio de las relaciones entre lingüística y cibernética, en el que analiza las causas de la falta de progresos en el campo de la inteligencia artificial, que tanta decepción ha supuesto para quienes ingenuamente esperaban demasiado de las computadoras.

Satosi Watanabe, pionero en el campo de la teoría de la información, expone mediante una serie de ejemplos cuáles son las ideas básicas que permiten cuantificar el grado de estructuración de un conjunto, que define como la diferencia entre la suma de las entropías de sus elementos y la entropía del todo. Tras analizar distintos tipos de codificación de la información (codificación por canales "silenciosos" y codificación por canales "ruidosos") dedica un apartado a los códigos de corrección de errores, terminando con otro en el que aborda el problema de lo que debería ser la teoría de la información y el de la relación entre información y cibernética.

El volumen finaliza con un artículo de Mario Bunge, que lleva por título *Metateoría*, la teoría de una teoría o de una clase de teorías. Tras referirse a la estructura algebraica de las teorías matemáticas y a la conexión entre teorías y filtros (tema por cierto tratado con excesiva superficialidad y falta de precisión), Bunge analiza algunas de las propiedades metateoréticas de las teorías matemáticas: consistencia absoluta y relativa, categoricidad, axiomatizabilidad, decibilidad y completitud. A las teorías matemáticas el autor contrapone las teorías científicas, a las que dedica tres capítulos en los que analiza su epistemología, su pragmática y su filosofía. Un tema muy interesante, que en ocasiones Bunge no parece dominar.

Señalaremos por último el descuido de la edición, con numerosas erratas. También es de lamentar que los responsables de la edición no se hayan preocupado de poner al día las biografías de los autores. Resulta, por ejemplo, chocante leer en un libro editado en castellano en 1983, que Mostowski (fallecido en 1975) "en la actualidad prosigue sus investigaciones sobre los modelos generalizados de la teoría de conjuntos y de los sistemas aritméticos". En cuanto a la traducción, desigual, en ocasiones se aparta bastante del lenguaje científico. (J. F. P.)

LAMBDA II. Dirigido por R. N. Hendrix, J. W. Roberts, F. W. Stahl y R. A. Weisberg. Cold Spring Harbor Laboratory; New York, 1983. No escaparán al lector las cualidades intrínsecas que posee el libro y que vienen respaldadas por la autoridad de los firmantes de los diferentes capítulos, aunque resulta sorprendente que uno de los estudiosos de este fago, el profesor M. Ptashene, esté ausente.

Se aprecia desde un comienzo la pretensión de la obra: resumir las principales aportaciones realizadas desde 1974, en que apareció su predecesor, *El bacteriófago lambda*. La introducción reproduce literalmente la presentada por Hershey y Dove en 1971 en el libro citado. Los capítulos sucesivos pasan revista al desarrollo lítico del fago, papel de los diferentes represores, control de la excisión e integración, inducción lisogénica, replicación del ADN, recombinación generalizada y especializada, fenómenos de ensamblaje vírico y, finalmente, evolución del denominado grupo lamboide e importancia de estos viriones como vehículo de clonación génica. El libro se cierra con sendos apéndices: el primero se centra en el mapa molecular del fago y el segundo indica la secuencia nucleotídica completa de las 48,5 kilobases del ADN fágico. Cualquiera de estos dos apéndices harán las delicias de los que de una forma u otra nos interesamos por el fago e indudablemente será un punto obligado de cita para los lambdólogos.

Al margen de la organización y especialmente de la distribución de los diferentes capítulos de que consta el libro, aspecto siempre susceptible de crítica en una obra de estas pretensiones (el capítulo presentado por Wernes Arber sobre "Guía para el principiante en la biología de lambda" quedaría mejor después de la introducción de Herskey, en vez de relegarlo casi al final), el resultado es bastante ponderado.

No han podido evitarse tampoco las repeticiones de conceptos e incluso de figuras. Es el caso de la figura 1 del capítulo redactado por Friedman y Gottesman, la 2 del escrito por Echols y Guarneros, la figura 4 del capítulo de Arber y finalmente la figura 2 del capítulo de Murray. Repeticiones que tienen su contrapartida favorable: el lector acaba por retener el orden de los principales módulos génicos del fago lambda.

De especial interés nos parece el trabajo de Arber y colaboradores sobre la utilidad del fago como vehículo de clonación molecular. Tras una breve introducción y resumen de la organización génica, los autores explican la "fabricación" de vectores derivados del fago, reconocimiento y selección de los recombinantes y, por último, las estrategias que pueden seguirse para que la clonación llegue a buen término. Quizá sería aconsejable empezar por aquí la lectura de la obra. (T. G. V. y J. R. V.)

TRATADO DE LAS ENFERMEDADES DE LOS ARTESANOS, por Bernardino Ramazzini. Traducción y notas de José L. Moralejo y Francisco Pejenaute. Estudio preliminar de Francisco L. Redondo. Ministerio de Sanidad y Consumo; Madrid, 1983. Se trata de la primera traducción castellana que se imprime en España de la obra pórtico de la medicina del trabajo, el *De Morbis Artificum* de Bernardino Ramazzini (1633-1714), escrito en 1700.

El presente libro incluye, luego de unos comentarios preliminares sobre

dicha obra y las advertencias de los traductores, el texto completo de la segunda edición latina de la misma (1713), última revisada por su autor, así como varios apéndices procedentes de la edición que preparó Adalberto Paccini en Roma en 1953.

Algún historiador ha calificado este *Tratado* como similar en importancia al *De Sedibus* de Morgagni, simbolizando como él el inicio de una nueva proyección, más sistemática, de la medicina hacia unos determinados problemas, los derivados de la lesión anatomopatológica, en el caso de Morgagni, los consecutivos al trabajo habitual para Ramazzini. Y, en efecto, nuestro autor tuvo conciencia de la novedad de su intento desde el mismo momento en que concibió la idea de registrar las afecciones más comunes a los operarios de las distintas profesiones, su modo de prevención y de tratamiento: "Nadie, que yo sepa, holló este campo", advierte en el prefacio, percepción que fija los límites de su ambición en conseguir "una obra que sirva de estímulo... (hasta que) consigamos tener un tratado íntegro y completo en todos sus aspectos". Nos encontramos, pues, con la primera manifestación literaria de preocupación sistemática del médico ante los riesgos del trabajo, aunque existieron, con anterioridad, algunas pocas monografías consagradas a riesgos específicos.

Consta de 41 capítulos consecutivos (a falta de un capítulo octavo), cada uno dedicado al análisis de una ocupación concreta: mineros, yeseros, panaderos, cargadores, etcétera, una disertación sobre las enfermedades de los hombres de letras, un suplemento (añadido en la segunda edición del *Tratado*), con 12 nuevos capítulos (tipógrafos, carpinteros, jaboneros y otros), una disertación sobre el cuidado de la salud de las vírgenes consagradas y dos índices, de artesanos y cosas notables, respectivamente, así como un capítulo XXV dedicado a los obreros de la construcción, presente en la edición de 1700 pero suprimido en la de 1713. Todo ello precedido por la biografía del autor tal como la escribió su sobrino Bartolomeo.

Cada capítulo, dedicado a una ocupación, reúne una copiosa erudición, médica, filosófica y poética junto a una no menos abundante información propia. Ramazzini expurga las obras de los clásicos grecorromanos, desde el *Corpus Hippocraticum* a Galeno, de Celso a Plinio el Viejo, de Platón a S. Agustín, de Virgilio a Marcial, la patrística (S. Jerónimo y otros) y la literatura que le es contemporánea (Van Helmont, Ettmüller, Borelli y otros) en busca de noticias referentes a los riesgos del trabajo, a las que acompañan sus propias observaciones, resultado de visitas exploratorias a los lugares de trabajo –"que, en este aspecto, son como centros escolares de los que uno sale más instruido", según nos cuenta–. Dichas observaciones están impregnadas de simpatía "para con la mísera condición de los artesanos", de cuyos trabajos, sin embargo, tan grandes beneficios se desprenden para la comunidad, mientras que es la enfermedad "el salario de la ocupación propia" (caso explícito de los mineros).

El análisis de Ramazzini determina una clasificación de los riesgos consecutivos al trabajo que va a quedar inscrita en los estudios posteriores, a saber, la distinción entre los procedentes del material empleado ("índole perjudicial de la materia manipulada") y los que derivan del propio proceso laboral ("movimientos violentos y descompuestos, así como forzadas posturas del cuerpo"). Al mismo tiempo, una característica *moderna* de su acercamiento es la continua preocupación preventiva. En los más de los casos obtiene sus recomendaciones de los propios hábitos de los distintos grupos de trabajadores, en otros muchos se lamenta de la imposibilidad de efectuar prevención alguna "dado que no puede quitarse la causa ocasional..." o "dado que tanto los príncipes como los mercaderes extraen con frecuencia grandes ganancias... y puesto que el uso de los metales es sumamente necesario...".

El *Tratado* de Ramazzini merece, con justicia, la atención que ha recibido en estos casi 300 años desde su aparición. Es una obra cuya lectura se hace ahora asequible al público interesado en España, aunque la ausencia de notas clarificadoras de conceptos o la terminología científica caduca (por ejemplo, la nomenclatura química dieciochesca: espíritu de tártaro, acrimonia, propiedad licuante, etcétera), marca un distanciamiento que, para el lector no especialista, puede ser barrera insuperable. (E. R. O.)

QUANTUM CHROMODYNAMICS. AN INTRODUCTION TO THE THEORY OF QUARKS AND GLUONS, por F. J. Ynduráin. Springer-Verlag, New-York, 1983. Se trata de una introducción a la cromodinámica cuántica, teoría considerada por la gran mayoría de físicos el primer instrumento adecuado de descripción de las interacciones fuertes. Desde el descubrimiento del neutrón en 1932 y el establecimiento de los primeros modelos nucleares, la descripción de las fuerzas capaces de ligar los protones y los neutrones en el núcleo había resultado bastante insatisfactoria. A pesar de éxitos parciales, como la teoría del pion de Yukawa, y la posterior detección experimental del pion, nunca se había dispuesto de una verdadera teoría que permitiera realizar cálculos. Desde los años cuarenta se habían ido sucediendo teorías y modelos que, con más o menos éxito, permitían explicar algunos hechos experimentales, pero siempre se ceñían a aspectos parciales o eran éxitos aproximados.

Tras la presentación del modelo SU(3) para clasificar las partículas, M. Gell-Mann y S. Zweig introdujeron la noción de quark, al que posteriormente el propio Gell-Mann (junto con Fritzsch) añadió la propiedad del "color". El estudio de la forma en que los quarks coloreados interaccionaban, unido a los resultados experimentales que sugerían que las partículas que interaccionaban fuertemente (los hadrones) estaban formadas por partes duras y aparentemente no interaccionantes, fue preparando el nacimiento de la cromodinámica cuántica (QCD). Se trata de una teoría de aforo basada en el grupo SU(3), como son el electromagnetismo de Maxwell o la teoría electrodébil (aunque éstas se basan en otros grupos), que describe las interacciones entre los quarks mediante el intercambio de los cuantos del campo fuerte, los gluones.

El volumen que reseñamos nos adentra en la QCD, fruto de algunos cursos que el profesor Ynduráin ha impartido en diversos lugares. El libro cubre un espectro muy amplio de materias, en tan sólo 227 páginas. Habla el título de "introducción", pero ello no debe engañarnos. No se trata de ningún texto para principiantes, sino de una obra avanzada que presenta una situación bastante completa de la teoría y que es en sí misma un buen instrumento de referencia.

El trabajo, después de unas páginas preliminares, plantea la QCD como lo que es, una teoría de campos cuánticos; se estudian las características propias, deteniéndose en los distintos esquemas de la renormalización y en una de las propiedades más interesantes de la QCD: la libertad asintótica, que hace que a muy alta energía los quarks se comporten como partículas libres, como habían puesto de manifiesto los experimentos de colisiones profundamente inelásticas de electrones y neutrinos sobre protones.

A este tema dedica la siguiente parte

del libro, donde se recoge esencialmente el desarrollo calculístico de la QCD y se compara con los resultados experimentales. Ynduráin aborda temas más especulativos, así el de la masa de los quarks y el análisis del vacío de la QCD, muy lejos todavía de dominarse del todo, o, por lo menos, carentes de la necesaria contrastación experimental.

También se incluye un apartado sobre los métodos funcionales de las teorías cuánticas de campos. (Trae a colación un texto de "Alicia en el país de las maravillas", cuya última frase, de la Reina, es sumamente éxpresiva: "¡Algunas veces he creído hasta en seis cosas imposibles antes del desayuno!".) No podían faltar en una obra de este tenor los métodos funcionales y las soluciones no perturbativas, aunque se dedique a ellos un espacio bastante reducido.

Propone, por último, una lista de temas que no examina pero sí menciona con las oportunas remisiones bibliográficas a las que puede acudir el lector interesado: cromodinámica cuántica en retículos, desarrollos $1/N$, modelos de bolsas, etcétera. Un conjunto de apéndices suponen la fijación de la notación y una buena fuente de resultados y fórmulas útiles.

En resumen, una obra valiosa para el especialista, editada en la prestigiosa colección "Texts and Monographs in Physics" de Springer-Verlag, en la que Ynduráin, del departamento de física teórica de la Universidad Autónoma de Madrid, expone la QCD, objeto de su trabajo a lo largo de un buen número de años y a la que tanto él como algunos de sus colaboradores han aportado desarrollos de interés. (R. P.)

EL ORIGEN Y DESARROLLO DE LA RELATIVIDAD, por José Manuel Sánchez Ron. Alianza Universidad; Madrid, 1983. Entre otros libros de temas parecidos en la misma colección, destaca éste por ser fruto de un trabajo concienzudo del autor que, afianzado en su conocimiento de las teorías relativistas, tema de investigación al que le ha consagrado bastantes años, inicia así un nuevo camino hacia la historia de las mismas y, a no tardar, hacia la filosofía de dichas teorías. Vía ésta más lógica y segura que el procedimiento inverso.

El libro no es más que la redacción, muchas veces sucinta, de esquemas que ha desarrollado con mayor extensión y que hubo de compendiar en un número de páginas limitado. ¿A quién va dirigido el libro? Para responder a esta pregunta cabe antes plantear otra más fundamental: ¿qué nivel en el conocimiento de la materia debe suponerse que posee el lector? Según el nivel que se tome, variará sensiblemente el número de personas al que va destinado. En el caso que nos ocupa, el nivel medio exige un conocimiento de las teorías relativistas correspondiente a un primer ciclo universitario; nivel que se mantiene bastante bien, aunque no siempre, como cuando se explica la aberración estelar de un modo en excesivo simplista, que nada dice, o cuando se explaya en largas fórmulas, ininteligibles para el presunto lector, que acompañan a la definitiva introducción por Einstein de la teoría de la relatividad general. (Aprovechará la lectura a quien pueda entender sin dificultad obras del tenor de *Introducción a la teoría especial de la Relatividad*, de R. Resnick, y *Essential Relativity*, de W. Rindler. Con esos dos ejemplos por delante, que Sánchez Ron no cita, fijaría yo el bagaje intelectual, el nivel del público destinatario.)

Una vez establecidos los prerrequisitos, destacaría dos cualidades de la obra. Su amenidad, al comprobar que la historia, aunque sea de la ciencia, es fruto del trabajo de muchas personas y de la confluencia de muchas ideas, sazonado con un poco de casualidad; y, otra, la base sólida que ofrece para introducirse en la epistemología subyacente.

En la historia que se nos relata aparecen las "modas" y las "escuelas". Válidas para entender el caso de Einstein y válidas para comprender la producción científica actual. La gran cantidad de profesionales dedicados a la investigación desarrolla una competencia que enjuicia precipitadamente a las personas, basándose muchas veces en criterios de "moda", que al cabo de pocos años se descubre completamente inadecuados. El que unos resultados sean o no interesantes depende muchas veces de quién los ha encontrado y de quién los reconoce como buenos. Las ideas de Ignatowsky (1910) sobre la introducción axiomática de la relatividad restringida sin el postulado de constancia de la velocidad de la luz me parecen extraordinariamente claras y, sin embargo, casi nunca han recibido el trato adecuado en los textos, hasta el extremo de que han sido "reencontradas" muchísimas veces debido a su poca divulgación. Si el propio Einstein hubiera tenido en 1910 el "gran respeto por las matemáticas" (pág. 151) que luego le merecieron, quizás hubiera prestado atención a ese trabajo, que hubiera quedado así definitivamente sancionado.

Como ejemplo del equilibrio inestable en que debe mantenerse el investigador, recordemos el respeto, o mejor la adoración, que por las matemáticas tenía Minkowski. Cuanto más compacto y sencillo en sus axiomas y más amplio en su campo de aplicación sea un modelo matemático de la realidad física, mayor aprecio recibirá; pero una cosa es el ideal deseable y otra la realidad física, que no es la que uno quiere sino la que es; de la que siempre van conociéndose nuevos aspectos, necesitados de nuevos modelos matemáticos.

La historia de la ciencia aclara dudas de interpretación e insta nuevas y fructíferas investigaciones. En el caso que nos ocupa, que Einstein, en su teoría de la relatividad restringida, considerara que la dinámica debería estar incluida o ser consecuencia de los axiomas o modelo matemático de la teoría, cosa que no consiguió, provocó y provoca que en casi todos los libros de texto se olviden de dar las leyes dinámicas de la relatividad restringida; provoca incluso que un número apreciable de trabajos destinados a aclarar los problemas dinámicos y el movimiento en sistemas no inerciales se reputen "desfasados".

Recordaré también el diferente comportamiento histórico de las comprobaciones experimentales de las dos teorías relativistas. En tanto que la relatividad restringida no conoció una oposición cerrada gracias en parte a la elegancia del modelo matemático y explicación de algunos experimentos ya realizados (podría considerarse por ello dentro de la discusión de si fue o no entonces una teoría "ad hoc"), cuando se introdujo la relatividad general se planteó inmediatamente ensayar la desviación de la luz (Eddington). Setenta y tantos años después, el cuadro experimental ha cambiado totalmente. Mientras la relatividad general explica sólo unos cuantos efectos específicos, los miles de experiencias diarias que tienen lugar en los aceleradores de partículas hallan su respaldo teórico en la cinemática más dinámica de choques que se deducen de la relatividad restringida.

En el seno de la física teórica han ido cambiado los objetivos y los medios con que se alcanzan nuevas soluciones. Einstein se esforzó por desentrañar las ideas, subyacentes en sus teorías, de los conceptos de espacio y tiempo. ¿Cómo explicaría hoy las ideas subyacentes en una teoría cuántica de campos? ¿Qué sensación fisiológica experimentaría Mach delante de uno de los grandes aceleradores del CERN? No sé si en algún momento la física teórica pudo ser más o menos popular o entrar por los sentidos, pero sí es evidente que en la actualidad no ocurre ni una cosa ni la otra. (L. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LACTANCIA MATERNA

INTERNATIONAL CODE OF MARKETING AND BREAST-MILK SUBSTITUTES. World Health Organization; 1981.

BREAST-MILK PRODUCTION IN AUSTRALIAN WOMEN. S. Rattigan, Ann V. Ghisalberti y P. E. Hartmann en *The British Journal of Nutrition*, volumen 45, número 2, págs. 243-249; marzo, 1981.

BREAST-FEEDING, FERTILITY, AND FAMILY PLANNING. *Population Reports, Series J*, vol. 9, n.° 24, págs. J525-J575; noviembre-diciembre, 1981.

NUBES MOLECULARES, FORMACION DE ESTRELLAS Y ESTRUCTURA GALACTICA

MOLECULAR CLOUDS IN GALAXIES. Mark Morris y L. J. Rickard en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 20, págs. 517-545; 1982.

THE SEARCH FOR INFRARED PROTOSTARS. C. G. Wynn-Williams en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 20, págs. 587-618; 1982.

COMPLEJOS GIGANTES DE NUBES MOLECULARES EN LA GALAXIA. Leo Blitz en *Investigación y Ciencia*, n.° 69, págs. 48-58; junio, 1982.

THE MOLECULAR GAS DISTRIBUTION IN M51. Nick Scoville y Judith S. Young en *The Astrophysical Journal*, vol. 265, n.° 1, 1.ª parte, págs. 148-165; 1 de febrero de 1983.

CELDILLA DE YUNQUES DE DIAMANTE PARA PRODUCIR ALTAS PRESIONES

THE DIAMOND CELL AND THE NATURE OF THE EARTH'S MANTLE. William A. Basset in *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 7, páginas 357-384; 1979.

INTERIORS OF THE GIANT PLANETS. D. J. Stevenson en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 10, págs. 257-295; 1982.

DIAMOND ANVIL CELL AND HIGH-PRESSURE PHYSICAL INVESTIGATIONS. A. Jayaraman en *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, n.° 1, págs. 65-108; enero, 1983.

EL TORNADO

TORNADO DYNAMICS. R. P. Davies-Jones en *Thunderstorms: A Social, Scientific, and Technical Documentary; Vol. 2. Thunderstorm Morphology and Dynamics*, dirigido por E. Kessler. U.S. Government Printing Office, 1982.

A REVIEW OF RECENT ADVANCES IN TORNADO VORTEX DYNAMICS. John T. Snow en *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, n.° 4, páginas 953-964; noviembre, 1982.

LA VISION POR HUMANOS Y MAQUINAS

FROM IMAGES TO SURFACES: A COMPUTATIONAL STUDY OF THE HUMAN EARLY VISUAL SYSTEM. William Eric Leifur Grimson. The MIT Press, 1981.

THEORETICAL APPROACHES IN NEUROBIOLOGY. Dirigido por Werner E. Reichardt y Tomaso Poggio. The MIT Press, 1981.

INTENSITY, VISIBLE-SURFACE, AND VOLUMETRIC REPRESENTATIONS. H. K. Nishihara en *Artificial Intelligence*, vol. 17, n.^{os} 1-3, págs. 265-284; agosto, 1981.

VISION. David Marr. W. H. Freeman and Company, 1982.

BASE MOLECULAR DE LA FORMA ANIMAL

CELL ADHESION MOLECULES. Gerald M. Edelman en *Science*, vol. 219, n.° 4584, págs. 450-457; 4 de febrero de 1983.

EARLY EPOCHAL MAPS OF TWO DIFFERENT CELL ADHESION MOLECULES. G. M. Edelman, W. J. Gallin, A. Delouvée, B. A. Cunningham y J.-P. Thiery en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 80, n.° 14, págs. 4384-4388; julio, 1983.

KINETICS OF HOMOPHILIC BINDING BY EMBRYONIC AND ADULT FORMS OF THE NEURAL CELL ADHESION MOLECULE. Stanley Hoffman y Gerald M. Edelman en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 80, n.° 18, págs. 5762-5766; septiembre, 1983.

EL COMPORTAMIENTO DE NIDIFICACION DE LOS DINOSAURIOS

NEST OF JUVENILES PROVIDES EVIDENCE OF FAMILY STRUCTURE AMONG DINOSAURS. John R. Horner y Robert Makela en *Nature*, vol. 282, n.° 5736, págs. 296-298; 15 de noviembre de 1979.

COMING HOME TO ROOST. John R. Horner en *Montana Outdoors*, vol. 13, n.° 4, págs. 2-5; 1982.

EVIDENCE OF COLONIAL NESTING AND "SITE FIDELITY" AMONG ORNITHISCHIAN DINOSAURS. John R. Horner en *Nature*, vol. 297, n.° 5868, páginas 675-676; 24 de junio de 1982.

MODELOS MATEMATICOS EN BIOLOGIA

MATHEMATICAL MODEL OF DENDRITIC SPINE DISTRIBUTION IN THE CEREBRAL CORTEX. A. Ruiz Marcos y F. Valverde en *Macromolecules. Biosynthesis and Function* (dirigido por S. Ochoa, C. Asensio, C. F. Heredia y D. Nachmansohn), vol. 21, págs. 269-273. Academic Press; New York, 1970.

DYNAMIC ARCHITECTURE OF THE VISUAL CORTEX. A. Ruiz Marcos y F. Valverde en *Brain Research*, vol. 19, págs. 25-39. Elsevier-North Holland, 1970.

FOUNDATION OF MATHEMATICAL BIOLOGY (vol. I, II y III). Dirigido por R. Rosen. Academic Press; 1973.

THE ORGANIZATION OF THE CEREBRAL CORTEX. Dirigido por F. O. Schmitt, F. G. Worden, G. Adelman y S. G. Dennis. The MIT Press; Cambridge, Mass., 1981.

MATURATION OF PYRAMIDAL CELLS OF THE CEREBRAL CORTEX IN HYPOTHYROIDISM. A. Ruiz Marcos, F. Sánchez-Toscano, F. Escobar del Rey y G. Morreale de Escobar en *Fetal Brain Disorders* (dirigido por B. S. Hetzel y R. M. Smith). Elsevier North-Holland, 1981.

WHAT IS BIOPHYSICS? A. Ruiz Marcos en *Proc. II Symposium de Ingeniería Biomédica* (dirigido por F. del Pozo, C. Hernández y G. Fernández), págs. 627-630. Publicaciones de la E.T.S.I. de Telecomunicaciones; 1983.

TALLER Y LABORATORIO

CHEMICAL THERMODYNAMICS. Frederick D. Rossini. John Wiley & Sons, Inc., 1950.

THE COMPLETE DAIRY FOODS COOKBOOK. E. Annie Proulx y Lew Nichols. Rodale Press, 1982.